

# **TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI**

Fakulta mechatroniky a mezioborových inženýrských studií

**studijní program: B 2612 – Elektrotechnika a informatika**

**obor: 2612R011 – Elektronické informační a řídicí systémy**

Katedra měření

## **Měření ekvivalentního objemu reproduktoru (Measuring of speaker's equivalent volume)**

**Jiří Žítek**

Vedoucí diplomové práce: Ing. Lubomír Slavík

Konzultant:

Rozsah práce:

Počet stran:	57
Počet obrázků:	33
Počet tabulek:	6
Počet grafů:	1
Počet příloh:	4

## Abstrakt

Vývoj zařízení pro měření akustických veličin, zaměřené na určování ekvivalentního objemu reproduktoru s cílem dosáhnout dostatečné přesnosti pro praktické průmyslové použití. Implementace digitálně řízeného sinusového generátoru, vzorkování vstupů a převádění pomocí převodníku s vysokým rozlišením.

## Anotace

Cílem bakalářské práce je vyvinout a realizovat multifunkční zařízení určené ke zjišťování parametrů reproduktorů různých velikostí a výkonů, které se zaměří na určení ekvivalentního objemu.

Základními kameny hardwaru jsou mikropočítač řady 8051 – AT89C51ED2, generátor sinusového průběhu (DDS) AD9850 a  $\Sigma$ - $\Delta$  převodník od firmy Analog Devices AD7731. Klíčovou částí zařízení je potom software psaný v assembleru, který zajišťuje komunikaci s počítačem standardu PC a obsluhu periférií. Zařízení umožní nejen měřit impedanci reproduktorů, ale zároveň je určeno pro měření obecných impedancí a je tedy koncipováno jako přenosné s použitím v terénu. Z toho důvodu je program v kontroléru vytvořen tak, aby zařízení bylo možno ovládat pomocí jednoduchých příkazů z jakéhokoliv terminálu, který umožňuje komunikaci pomocí rozhraní RS-232 a zároveň bude možno naprogramovat specializované měřicí aplikace pro nadřazený systém.

## **Abstract**

Development of the device for acoustic values measuring, concentrated to specification of equivalent volume of speakers with the aim to reach good accuracy for industry using. Implementation of digital synthesis generator, signal sampling and using AD converter with high resolution.

## **Annotation**

The aim of bachelor work is developing and realization of multifunction device specified to measuring speakers' parameters of different volumes and power. The main concentration is to measuring of equivalent volume.

Microcontroller AT89C51ED2, generator of sine waveform (DDS) AD9850 and  $\Sigma$ - $\Delta$  analogue to digital converter AD7731 are the basic parts of the hardware. Software, written in assembler, is the key part of the device. This software allows communication with computer of PC type and takes care of peripherals.

Device provides not only measuring of speakers, but also is pointed out to measuring of general impedances and is specified like portable device. That's why the program is made for easy using, so that the device can be controlled via RS232 by simple commands from whatever terminal. Implemented software also provides good possibility for controlling from specialized measuring system.

## Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 o právu autorském, zejména § 60 (školní dílo).

Beru na vědomí, že TUL má právo na uzavření licenční smlouvy o užití mé DP a prohlašuji, že **s o u h l a s í m** s případným užitím mé diplomové práce (prodej, zapůjčení apod.).

Jsem si vědom toho, že užít své diplomové práce či poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem TUL, která má právo ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, vynaložených univerzitou na vytvoření díla (až do jejich skutečné výše).

Diplomovou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím diplomové práce.

Datum

14. května 2007

Podpis

## **Poděkování**

Děkuji všem, kteří mi pomohli s realizací mé bakalářské práce, jmenovitě pracovníkům katedry měření, Ing. Lubomíru Slavíkovi. Děkuji za poskytnutí prostor a měřících přístrojů organizaci Ymca Liberec a rodičům za božskou trpělivost, jídlo a ošacení.

<b>PŘEHLED POUŽITÝCH ZNAČEK A SYMBOLŮ .....</b>	<b>2</b>
<b>ÚVOD .....</b>	<b>3</b>
<b>1. ZÁKLADNÍ FYZIKÁLNÍ PRINCIPY AKUSTICKÝCH MĚNIČŮ .....</b>	<b>4</b>
1.1 Zvuk a jeho šíření .....	4
1.2 Elektroakustické měniče .....	4
1.2.1 Parametry reproduktorů .....	4
1.2.2 Elektromechanická analogie .....	6
1.3 Elektrodynamický přímovyzářující reproduktor .....	6
1.4 Náhradní obvod reproduktoru .....	7
1.5 Ozvučnice .....	9
1.5.1 Desková ozvučnice .....	10
1.5.2 Otevřená skříňová ozvučnice .....	10
1.5.3 Uzavřená skříňová ozvučnice .....	11
1.5.4 Skříňová ozvučnice typu bass-reflex .....	11
<b>2. METODY MĚŘENÍ .....</b>	<b>13</b>
2.1 Volba metody .....	13
2.2 Technologie měření a měřicí systém .....	14
<b>3. REALIZACE A KONSTRUKCE ZAŘÍZENÍ .....</b>	<b>15</b>
3.1 Řídící procesorová jednotka .....	16
3.1.1 AT89c51ED2 .....	17
3.1.2 Komunikace .....	17
3.2 Blok generátoru funkcí .....	18
3.3 KZ – koncový zesilovač .....	19
3.3.1 Zapojení KZ .....	20
3.4 Vstupní obvod .....	22
3.4.1 Nastavení zesílení .....	23
3.5 A/D převodník .....	24
3.5.1 Chyby A/D převodníku .....	24
3.5.2 Princip aproximačního A/D převodníku .....	26
3.5.3 Modulační A/D převodníky .....	27

3.5.4 A/D převodníky s přímým převodem (paralelní) .....	28
3.5.5 Volba převodníku .....	29
3.5.6 $\Sigma$ - $\Delta$ převodník AD7731 .....	29
<b>4. ZDROJ .....</b>	<b>31</b>
4.1 Transformátor .....	32
<b>5. USAZENÍ JEDNOTLIVÝCH DÍLŮ DO ŠASI .....</b>	<b>33</b>
5.1 Návrh desky plošných spojů .....	33
5.2 Usazení v krabici .....	35
5.3 Čelní panel .....	36
<b>6. MĚŘICÍ OZVUČNICE .....</b>	<b>37</b>
<b>7. SOFTWARE .....</b>	<b>38</b>
7.1 Zpracování dat .....	39
7.2 Vyhodnocování zpráv .....	39
7.3 Ovládání periferií .....	40
7.4 Dekódování zpráv .....	40
7.5 Obslužná aplikace .....	40
<b>8. PROTOKOL O MĚŘENÍ <math>V_{AS}</math> NA REPRODUKTORU ARN 6604 .....</b>	<b>41</b>
<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>44</b>
<b>LITERATURA .....</b>	<b>45</b>
<b>PŘÍLOHA 1 – ČELNÍ PANEL .....</b>	<b>46</b>
<b>PŘÍLOHA 2 – SKICA MĚŘICÍ OZVUČNICE .....</b>	<b>47</b>
<b>PŘÍLOHA 3 – SCHÉMATA .....</b>	<b>48</b>
<b>PŘÍLOHA 4 – OBSAH CD .....</b>	<b>51</b>

## Přehled použitých značek a symbolů

Pe	[W]	příkon reproduktoru
SPL	[dB/W/m]	charakteristická citlivost
max SPL	[dB]	maximální akustický tlak
Qms	[ ]	mechanický činitel jakosti
Qes	[ ]	elektrický činitel jakosti
Qts	[ ]	celkový činitel jakosti
Re	[ohm]	stejnosměrný odpor kmitací cívky
Le	[mH]	indukčnost kmitací cívky
Cms	[μm/N]	poddajnost závěsu reproduktoru
Vas	[l]	ekvivalentní objem
F	[N]	budící síla
m <sub>c</sub>	[kg]	hmotnost cívky
m <sub>m</sub>	[kg]	hmotnost membrány
m <sub>v</sub>	[kg]	hmotnost spolukmitajícího vzduchu
R <sub>m</sub>	[Nsm <sup>-1</sup> ]	mechanický odpor okraje membrány
R <sub>s</sub>	[Nsm <sup>-1</sup> ]	mechanický odpor středícího prvku
R <sub>v</sub>	[Nsm <sup>-1</sup> ]	reálná část vyzařovací impedance
C <sub>s</sub>	[N/m]	poddajnost středícího prvku
C <sub>m</sub>	[N/m]	poddajnost membrány



# Úvod

V poslední době se na trh s reproduktory dostávají laciné výrobky pocházející z Asie, kde s rozvojem výpočetní techniky a implementací nových technologií dokáží produkovat relativně kvalitní výrobky. Dovozci mnohdy nedodávají dokumentaci v takovém rozsahu, jako jsme zvyklí u evropských producentů a to byl důvod, proč jsem se pustil do vývoje měřidla, které dokáže zjistit nejdůležitější údaje reproduktorů. Dle naměřených údajů je pak možno optimalizovat velikost ozvučnice.

Běžně se uvádí výkon RMS, rezonanční frekvence a citlivost. Tyto parametry však k výpočtu ozvučnice nestačí. Dalším důležitým údajem je potom ekvivalentní objem  $V_{as}$ .

Úkolem této práce proto bude nalézt vhodnou metodu měření parametru  $V_{as}$  a navrhnout zařízení pro jeho měření s možností rozšíření funkcí měřicího přístroje i na zjišťování jiných akustických veličin a to určování rezonancí v uzavřených prostorech, zkoumání odrazů a měření hlučnosti prostředí.

Zařízení by mělo být přenosné, snadno ovladatelné a precizní zvláště co se týká konektorů. Ty však musí být umístěny tak, aby byly snadno dostupné a umožňovaly co možná největší flexibilitu přístroje.

Z hlediska obsluhy by se měl přístroj chovat jednoduše. Měl by umožnit ovládání pomocí nadřazeného počítače, kterým bude v našich zeměpisných šířkách nejčastěji počítač standardu PC a komunikovat s ním v jednoduchých příkazech, tak aby umožnil případný vznik nadstavbové aplikace a automatického měření. Komunikace by potom měla probíhat pomocí RS-232.

# 1. Základní fyzikální principy akustických měničů

## 1.1 Zvuk a jeho šíření

Kmitá-li těleso v prostředí, jehož částice jsou vzájemně vázané, přenáší se energie z tělesa na okolní prostředí. Vznikne pohyb, který nazýváme vlnění. O tomto vlnění mluvíme jako o zvuku pokud je jeho kmitočet v rozsahu od 16Hz do 20kHz.

Zvukové vlny se šíří od zdroje vlnění ve vlnoplochách rychlostí zvuku  $c = 330\text{m/s}$  a platí pro ně vztah:

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (2.1)$$

$\lambda$  [m] je vlnová délka a  $f$ [Hz] frekvence.

Energie vlnění jež se šíří v ideálních podmínkách z bodového zdroje v homogenním prostředí má stále stejnou energii v každé vlnoploše. Jelikož je povrch koule dán vztahem:

$S = 4\pi r^2$ , intenzita zvuku  $I$  [ $\text{Wm}^{-2}$ ] klesá s druhou mocninou vzdálenosti.

## 1.2 Elektroakustické měniče

Elektroakustický měnič přeměňuje elektrický signál na akustický a opačně. Přeměna se většinou děje pomocí mechanických prvků, které při změně akustického tlaku reagují změnou potenciálu. Takové měniče nazýváme mikrofony. Elektromechanický měnič, který přeměňuje elektrický signál na mechanický pohyb je reproduktor. Nejznámější používané principy měničů jsou: elektromagnetický, elektrodynamický, elektrostatický, piezoelektrický a magnetostrikční.

### 1.2.1 Parametry reproduktorů

**Pe [W] - Power** - Zatížitelnost reproduktoru udává hodnotu trvalého příkonu do kmitací cívky.

**Z [ $\Omega$ ] - Impedance** - Jmenovitá impedance je výrobcem uvedená hodnota odporu rezistoru, kterým se nahrazuje reproduktor pro účely definování elektrického výkonu dostupného ze zdroje.

**SPL [dB/W/m] - Sensitivity** - Charakteristická citlivost určuje úroveň akustického tlaku vyvolaného reproduktorem při vybuzení výkonem 1 W ve vzdálenosti 1 m od reproduktoru. Tato veličina jde popsat jako účinnost akustického měniče.

**max SPL [dB]** – Maximální akustický tlak je intenzita hluku, kterou je schopen reproduktor vyprodukovat při maximálním příkonu.

#### **Qes - Electrical Q-factor - Elektrický činitel jakosti**

Bezrozměrná veličina., která v sobě zahrnuje vliv elektrických ztrát v kmitací cívce reproduktoru.

#### **Qms - Mechanical Q-factor - Mechanický činitel jakosti**

Bezrozměrná veličina., která v sobě zahrnuje v sobě vliv mechanických ztrát pohyblivých částí reproduktoru.

#### **Qts - Total Q-factor - Celkový činitel jakosti**

Parametr Qts zohledňuje oba předchozí parametry.

#### **Re [ $\Omega$ ] - DC voice coil resistance – stejnosměrný odpor kmitací cívky**

Parametr Re udává stejnosměrný odpor cívky reproduktoru, což je nejnižší hodnota impedance reproduktoru v přenášeném frekvenčním pásmu.

#### **Le [mH] - Voice coil inductance - Indukčnost kmitací cívky**

Indukčnost je veličina vyjadřující velikost magnetického indukčního toku kolem cívky při jednotkovém elektrickém proudu procházejícím cívkou.

#### **Cms [ $\mu$ m/N] - Suspension compliance - Poddajnost závěsu reproduktoru**

Čím je tato hodnota vyšší, tím je závěs poddajnější. Cms je ale parametr, jehož hodnota se během provozu mění a také je značně závislý na výchylce, většinou se s rostoucí výchylkou zmenšuje.

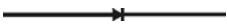


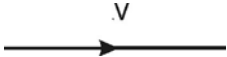





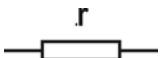
#### **Mms [g] - Moving mass - Hmotnost membrány reproduktoru**

#### **Vas [l] - Equivalent air volume - Ekvivalentní objem**

Ekvivalentní objem je objem vzduchu v uzavřené ozvučnici, který má stejnou poddajnost jako hodnota Cms daného reproduktoru.

## 1.2.2 Elektromechanická analogie

V praxi je vhodné převést mechanické veličiny na elektrické, protože teorie elektrických obvodů je dobře zpracována. Přiřazení veličin jednotlivým obvodovým prvkům je v tabulce 1.1.

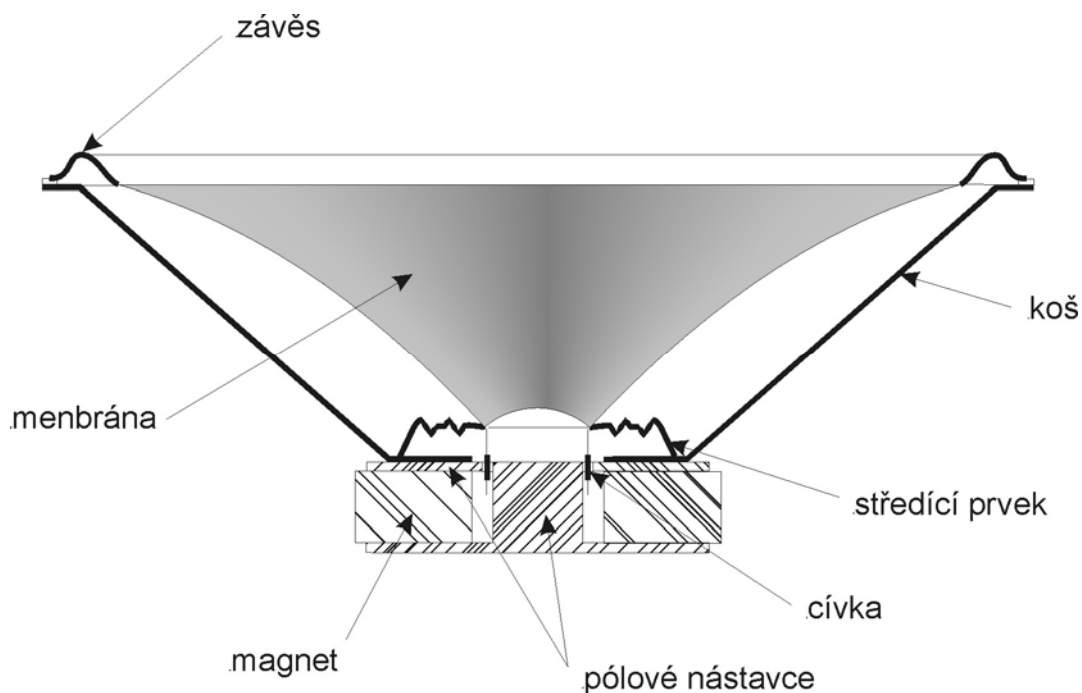
symbol v mechanickém schématu	mechanická soustava	symbolsy v analogickém obvodu	elektrický obvod
	síla $F$ [N]		napětí $u$
	rychlost $v$ [m/s]		proud $i$
	hmota $m$ [kg]		indukčnost $L$
	poddajnost $e$ [m/N]		kapacita $C$
	mech. odpor [Ns/m]		odpor $R$

tabulka 1.1.: Převod veličin z mechanických na obvodové

## 1.3 Elektrodynamický přímovyzářující reproduktor

Nákres elektrodynamického reproduktoru naleznete na obr. 1.1. Zvuková energie se šíří rozkmitáním membrány, která je aktivována kmitací cívkou. Indukčnost, navinutá na válečkovém formelu, se umístí v homogenním poli stálého magnetu. Průchodem proudu vodičem cívky vzniká síla  $F$  [N], ta se buď přičítá, nebo odečítá od silových účinků permanentního magnetu. Celý systém je zabudován v koši, který tvoří základnu reproduktoru. Okraj membrány musí být vyroben z poddajného materiálu, tak aby umožnil membráně

pohyb v axiálním směru. Samotná membrána se pak zhotoví tuhých z látek, které mají velké vnitřní tření. Kmitací cívka je zajištěna středícím prvkem. Nesmí dojít ke třením cívky o magnet.

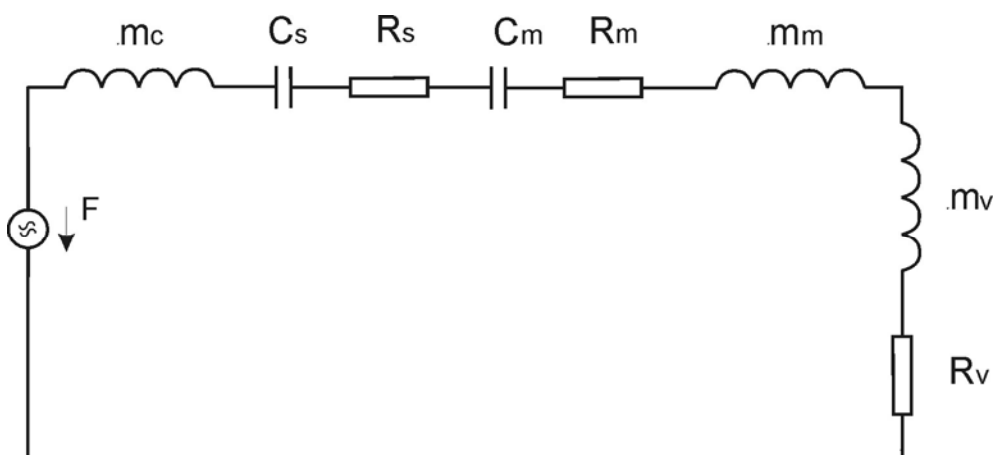


*Obr. 1.1: elektrodynamický reproduktor*

Množství energie předané reproduktorem do okolí je závislé na impedančním přizpůsobení prostoru (tak jako u každého zdroje). Protože okolní vzduch představuje jen malou zátěž bude i účinnost reproduktoru velmi malá, ta však není ovlivněna pouze přizpůsobením prostoru do které měnič pracuje, ale také vlivy, které vyplývají z rozboru náhradního schématu.

## **1.4 Náhradní obvod reproduktoru**

Náhradní mechanické schéma je na obrázku 2.2. Zjištění hodnot obvodových prvků skutečného reproduktoru je velmi často problém, proto není snadné nasimulovat chování měniče některým specializovaným softwarem.



Obr 1.2.: náhradní zapojení elektrodynamického reproduktoru

Význam jednotlivých prvků obvodu je následující:

$m_c$ – hmotnost cívky a středícího prvku	[kg]
$C_s$ – poddajnost středícího prvku	[N/m]
$R_s$ – mechanický odpor středícího prvku	[Nsm <sup>-1</sup> ]
$C_m$ – poddajnost membrány	[N/m]
$R_m$ – mechanický odpor okraje membrány	[Nsm <sup>-1</sup> ]
$m_m$ – hmotnost kmitající části membrány	[kg]
$R_v$ – reálná část vyzařovací impedance	[Nsm <sup>-1</sup> ]
$m_v$ – hmotnost spolukmitajícího vzduchu	[kg]

Ve schématu je použit pro napájení obvodu zdroj síly. Tím jsem nahradil vstupní elektrickou část, kde dochází ke transformaci elektrické energie podle následujícího vzorce:

$$F = Bil \text{ [N]} \quad (1.1),$$

kde  $F$ [N] je síla,  $B$ [T] magnetická indukce,  $I$  [A] proud a  $l$ [m] délka vodiče.

Hmotnost kmitajícího systému  $m_{cm}$ , tj. cívky a membrány ( $m_{cm} = m_c + m_m$ ), spolu s poddajností tohoto systému ( $C_{sm} = \frac{1}{C_s} + \frac{1}{C_m}$ ) tvoří mechanický sériový rezonanční obvod.

Platí pro něj vztahy:

rezonanční kmitočet

$$f_r = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{C_{sm}(m_{cm} + m_v)}} \quad [\text{Hz}] \quad (1.2)$$

mechanická jakost obvodu

$$Q_{ms} = \frac{\omega_r(m_{cm} + m_v)}{R_z + R_v + R_e} \quad [ ] \quad (1.3)$$

$$\text{kde } \omega_r = 2\pi f_r \quad [\text{rad/s}]$$

$$R_z = R_s + R_m \quad [\Omega]$$

$$R_e = \frac{(Bl)^2}{R_i + R} \quad [\Omega]$$

$R_i$  [ $\Omega$ ]- je vnitřní odpor zdroje signálu.

$R$  [ $\Omega$ ]- odpovídá odporu vinutí kmitací cívky

## 1.5 Ozvučnice

Ozvučnice je pro konstrukci reproduktorové soustavy zásadní věc. Slouží k přizpůsobení reproduktoru s okolním prostředím. Přímovyzářující reproduktor vytváří akustický tlak na obou stranách membrány. Akustické tlaky jsou v protifázi (akustický zkrat), proto dochází k útlumům kmitočtové charakteristiky na vlnových délkách větších než je velikost membrány. Pro odstranění akustického zkratu se reproduktory montují na desky, které nazýváme ozvučnice.

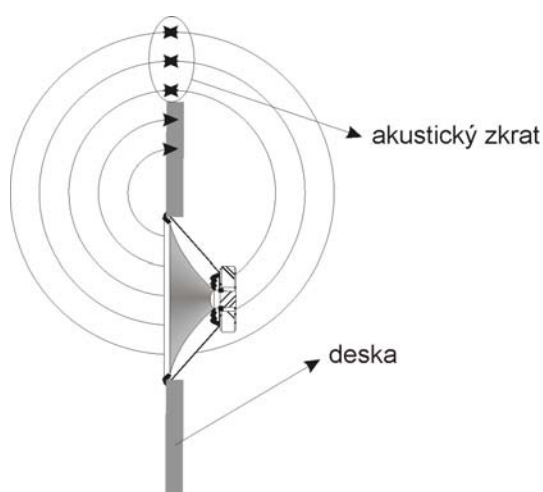
Podle konstrukčního uspořádání se ozvučnice dělí na:

- 1) deskové
- 2) skříňové otevřené
- 3) skříňové uzavřené
- 4) basreflexové

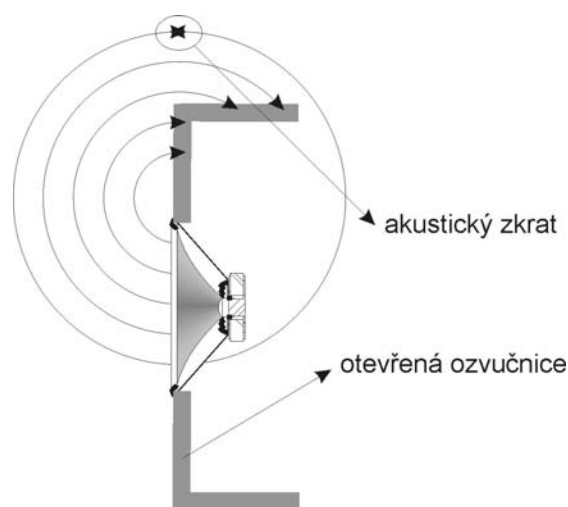
## 1.5.1 Desková ozvučnice

Toto řešení je sice v dnešní době již zastaralé, nicméně popisuje problematiku akustických zkratů velmi názorně. Nákres deskové ozvučnice naleznete na obr 2.3.

Jednou z nevýhod reproduktorů je to, že vyzařují na obou stranách membrány. Tím dochází k šíření vln s opačnou fází. Takže při interferenci dojde k odečtení signálu a ke zkreslení kmitočtové charakteristiky. Prvotním úkolem ozvučnice bylo tedy tomuto jevu zabránit.



Obr 1.3.: desková ozvučnice



Obr 1.4.: otevřená skříňová ozvučnice

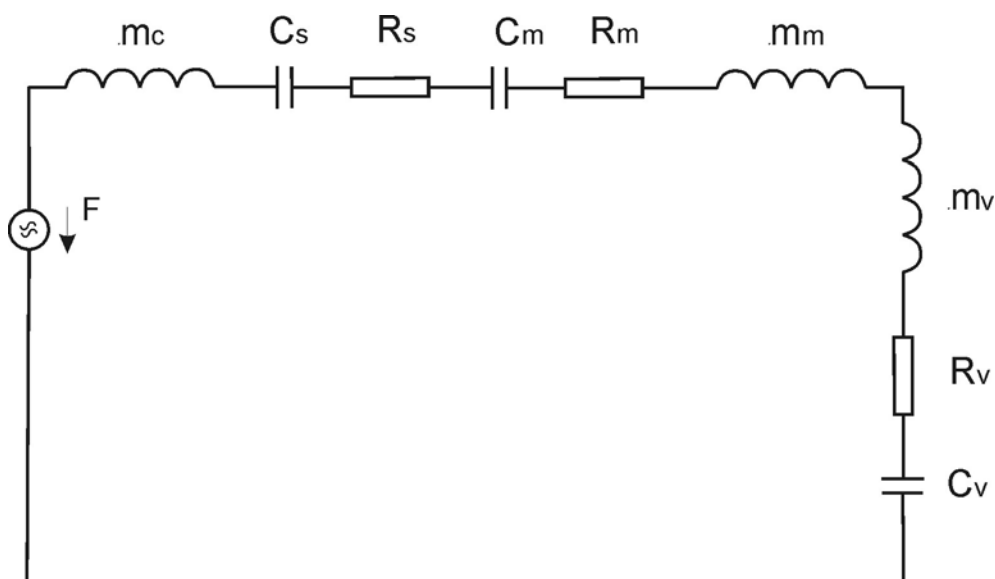
## 1.5.2 Otevřená skříňová ozvučnice

Ani princip otevřené skříně není v dnešní době nejpoužívanějším, ale stojí za zmínku už z důvodu toho, že se tak podařilo z velké části odstranit akustický zkrat. Důvodem proč se výše uvedené typy usazení reproduktorů nepoužívají je vysoko položený dolní kmitočet frekvenční charakteristiky a značná velikost.



### 1.5.3 Uzavřená skříňová ozvučnice

Zabudováním reproduktoru do uzavřené skříně dokonale odstraníme akustický zkrat. Na druhou stranu se za membránou objevila další kapacita reprezentovaná tuhostí vzduchu v uzavřeném prostoru. To má za následek posunutí rezonančního kmitočtu nad rezonanci reproduktoru. Náhradní schéma uzavřené ozvučnice je na obr 1.5.



Obr 1.5.: náhradní zapojení uzavřené ozvučnice, kde  $C_v$  je tuhost vzduchu v uzavřeném prostoru.

Poddajnost uzavřeného prostoru objemu  $V$  je pro prázdný prostor bez tlumícího materiálu

rovna:  $C_v = \frac{V}{c_0^2 \rho \cdot S_a^2}$  [N/m], kde  $V$  - objem ozvučnice,  $c_0$  – rychlost zvuku,  $\rho$  –

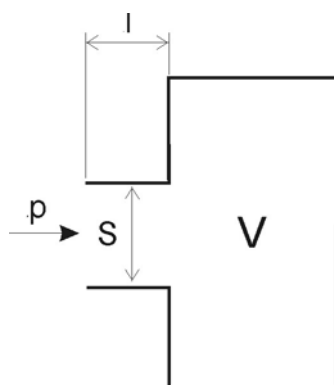
hustota vzduchu,  $S_a$  – užitečná plocha membrány.

### 1.5.4 Skříňová ozvučnice typu bass-reflex

Takto zhotovená ozvučnice funguje na principu Helmholtzova rezonátoru. Hlavní výhodou této konstrukce je pak zlepšení vlastností na dolních kmitočtech pokud jde o věrnost reprodukce. Důvodem je fakt, že akustický obvod, reprezentovaný otvorem v ozvučnici, otáčí fázi signálu téměř o  $180^\circ$ . Tím pádem dochází ke sčítání akustického tlaku před

a za reproduktorem. Pro dosažení určité hladiny zvuku tedy není potřeba tak velká výchylka. Z toho vyplývá menší harmonické zkreslení.

**Helmholtzův rezonátor** je akustický rezonanční obvod tvořený uzavřeným prostorem a otvorem přesně daných rozměrů pro který platí:  $f_r = 54 \sqrt{\frac{S}{Vl}}$  [Hz]. Kde  $l$ [m] je délka hrdla,  $V$ [l] objem uzavřené ozvučnice a  $S$ [m<sup>2</sup>] plocha vstupního obvodu. Nákres rezonátoru najdete na obr. 1.6. Pro dosažení nejlepších parametrů se potom volí  $f_r$  stejná jako je rezonanční kmitočet reproduktoru.



*Obr. 1.6: rezonátor*

## 2. Metody měření

Ekvivalentní objem reproduktoru lze zjistit hned několika způsoby:

- 1) Destruktivní metoda spočívá v rozebrání celého kmitacího systému a v kvalifikaci jednotlivých částí, jež se nakonec dosadí do matematického modelu. Pro každý typ reproduktoru by se muselo provést několik měření, což by bylo drahé a málo efektivní.
- 2) Metoda přímá, která se realizuje zařízením měnícím objem ozvučnice. V tomto případě by se pak hledalo maximum akustického tlaku. Podstatnou nevýhodu se pak stává vliv prostředí hlavně hluk z okolí a odrazy zvuku.
- 3) Rezonanční metoda
  - a) zkoumáním vlastních kmitů při poklepu na membránu,
  - b) hledáním rezonanční frekvence v uzavřené přesně definované ozvučnici a ve volném prostoru.

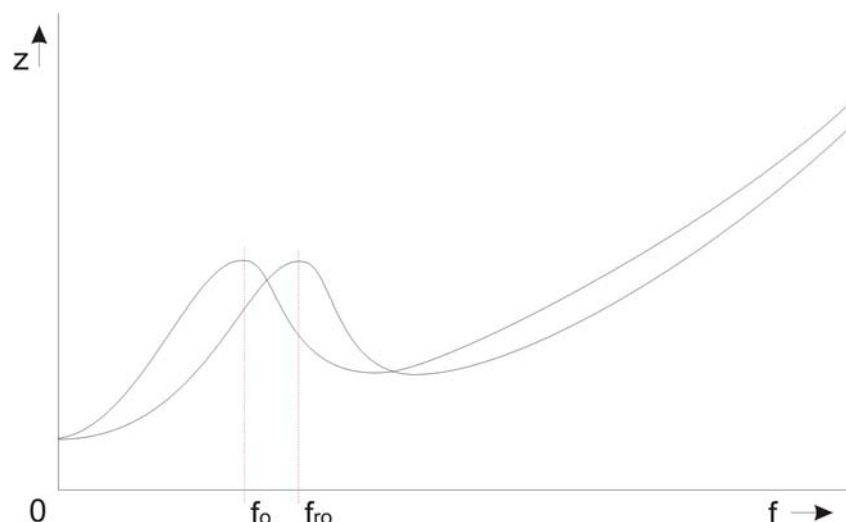
### 2.1 Volba metody

Ekvivalentní objem není veličina, která se dá snadno přímo změřit. Proto jsem zvolil metodu, která je relativně nenáročná a není pro její realizaci potřeba speciální prostor ani zařízení. Protože hodnota  $V_{as}$  závisí podle vzorce

$$V_{as} = V_{ro} \left( \frac{f_{ro}}{f_o} \right)^2 - 1 \quad [l] \quad (2.1)$$

na objemu  $V_{ro}$  [l], rezonančním kmitočtu  $f_o$  [Hz], což je rezonanční kmitočet reproduktoru v otevřeném prostoru a  $f_{ro}$  [Hz], který je zjištěn v měřicí uzavřené skříňové ozvučnici.

Rezonanční kmitočet je závislý na impedanci elektrického obvodu, tedy cívky. Najdeme ho tehdy, pokud zjistíme maximum impedance pro dolní kmitočty. Průběh impedance je na obrázku 2.1



*Obr. 2.1: průběh impedance kmitací cívky v závislosti na frekvenci*

## 2.2 Technologie měření a měřicí systém

Dalším úkolem je najít vhodnou technologii pro měření impedance v závislosti na frekvenci.

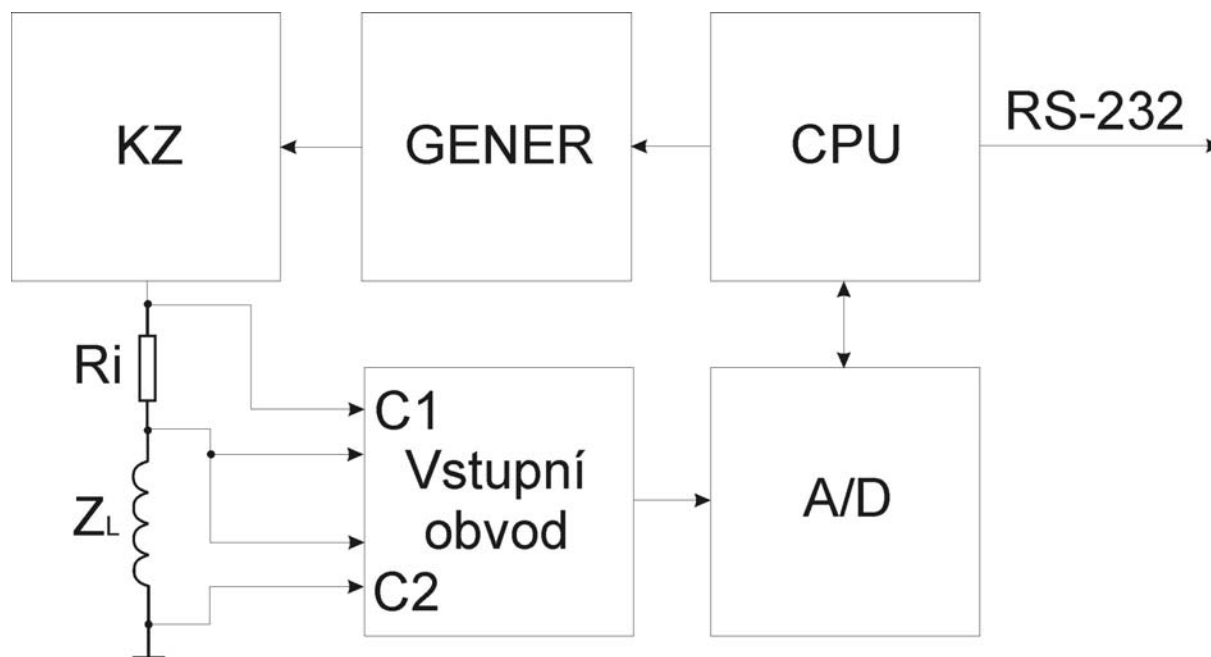
První možností měření byla měřicí karta některé ze specializovaných firem. Výhodou jsou zkalibrované měřicí vstupy a výstupy. Oproti tomu stojí vysoké pořizovací náklady a malá dostupnost.

Druhá varianta se sestává z konstrukce vlastního zařízení zaměřeného na měření proudu a napětí při dané frekvenci, kde takto získané informace budou předány nadřazenému systému, který je vyhodnotí. Výhodou tohoto řešení je snadná adaptace zařízení nejen pro tuto úlohu, ale i pro další akustická měření. Nevýhodou je pak fakt, že se musí měřidlo zkalibrovat a stanovit chyba.

Třetí možností je použití specializovaného obvodu AD5933 pro měření impedance, což se ukazuje jako nejlepší varianta. Obvod komunikuje po sběrnici I2C a proto je potřeba pro jeho řízení a komunikaci s nadřazeným systémem připojit řídicí procesor. Výhodou je definovaná přesnost a kompaktnost provedení. Bohužel tento obvod je možno zajistit jen v množství nad 100 kusů, proto by toto řešení nebylo ekonomicky únosné.

### 3. Realizace a konstrukce zařízení

Vzhledem k výše uvedeným možnostem jsem zvolil druhou variantu. Blokové schéma je na obr. 3.1, kterou dále rozvedu při popisu jednotlivých bloků.



Obr. 3.1: KZ – koncový zesilovač, GENER – sinus generátor s digitálním laděním kmitočtu,  $R_i$  – měřicí odpor

Vstupní obvod vzorkuje dva vstupní kanály, které se převádějí pomocí A/D. Získaná data zpracovává CPU a odesílá je nadřazenému systému. Jednotka CPU dále ovládá generátor sinusového průběhu napětí. Jeho výstup je přiveden na koncový zesilovač.

Postup měření:

- 1) nastavení požadované frekvence a úrovně budičího sinusového signálu
- 2) navzorkování napětí na kanálech C1 a C2
- 3) zpracování a odeslání dat nadřazenému systému
- 4) čekání na další instrukce

Impedance je pak dána vztahem:

$$Z(f) = \frac{U}{I} [\Omega] \quad (3.1)$$

$Z(f)$  je impedance závislá na frekvenci,  $U$  napětí na výstupu koncového reproduktoru,  $U_{R_i}$  úbytek napětí na přesném odporu  $R_i$ . Proud  $I$  ze vzorce 3.1 je určen vztahem 3.2

$$I = \frac{U_{R_i}}{R_i} [A] \quad (3.2)$$

Vzhledem ke skutečnosti, že impedance reproduktoru má komplexní charakter a tudíž dochází k posuvu fáze mezi napětím a proudem, byla zvolena hodnota odporu  $R_i$  velmi nízká v porovnání s impedancí reproduktoru. Fázové posuvy je pak možné zanedbat.

Měření je několikrát opakováno a výsledná hodnota je pak průměrem naměřených hodnot. Posledním krokem je potom hledání maxima impedance a určení rezonančních frekvencí. Z těch se potom vypočítá ekvivalentní objem měřeného reproduktoru. Viz vzorec (2.1)

### 3.1 Řídící procesorová jednotka

CPU – řídící procesorová jednotka má za úkol obsloužit veškeré periferie, zajisti bez chybovou komunikaci s nimi i s nadřazeným systémem. Proto je potřeba zvolit takový procesor, který má implementovaná potřebná rozhraní i sběrnice a poskytuje potřebný výpočetní výkon.

Požadavky na procesor: 32 vstupně výstupních pinů, nejméně osmibitová sběrnice, hardwarový SPI, nebo I2C kontrolér, možnost sériového programování, UART, 8kbyt paměti programu, 1Mips výpočetní výkon.

Protože všechny požadavky splňuje AT89C51ED2, zvolil jsem právě tuto platformu od firmy Atmel. Nejedná se sice o nejmodernější jádro, ale pro výše uvedené účely plně postačuje.

### 3.1.1 AT89c51ED2

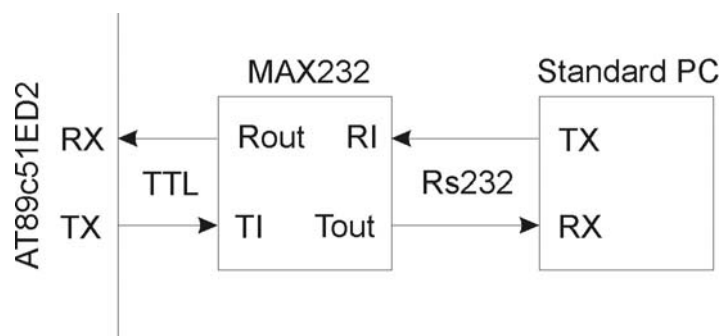
Jednočipový kontrolér AT89c51ED2 je postaven na jádře c51 a rozšířen o několik hardwarových rutin pro obsluhu EEPROM paměti, SPI, ovladač maticové klávesnice a další.

Obsahuje čtyři 8mi bitové vstupně – výstupní porty, které mají v logické jeničce vysokou impedanci a jsou tak nastaveny na příjem dat. Aby mohl procesor ovládat nějaký další obvod vysokou úrovní, musí mít na každém z příslušných pinů pul-up. Port P0 má na výstupu otevřený kolektor.

Rychlost zpracování instrukcí [ips] lze ovlivnit zapojením různého krystalu, nebo nastavením děličky systémových hodin. Jedna instrukce potom trvá nejméně 6 taktů frekvence krystalu. Ta může být až 60MHz. Napájecí napětí se smí pohybovat v rozsahu od 2,7 do 5,5V.

### 3.1.2 Komunikace

Předávání informací nadřazenému systému se děje pomocí sériového rozhraní UART zabudovaného přímo v kontroléru. Nadřazeným systémem bude počítač standardu PC, který používá z pravidla dvě sériová rozhraní USB a RS232. Z hlediska rychlosti a spolehlivosti přenosu je výhodnější USB. Převodník z USB na UART je ale značně dražší než MAX232, který se standardně používá pro RS232. Použil jsem rozhraní RS232 i přes to, že je nutné řešit přenosový protokol některým z redundantních kódů, pro zaručení bezchybového spojení.



Obr.3.2: blokové schéma přenosového kanálu mezi CPU a nadřazeným systémem.

Druhým informačním kanálem je potom 14-ti bitová sběrnice BUS1 sloužící pro obsluhu a řízení ostatních podřízených systémů procesoru, kde 11 pinů je datových a zbylé 3 napájecí. Ta umožňuje 8mi bitový paralelní přenos a synchronní sériový datový tok.

Třetí sběrnici je potom BUS2, která se skládá z 12ti bitů pro přenos dat a dalších dvou řídicích signálů. Blokové schéma je na obrázku 3.3.

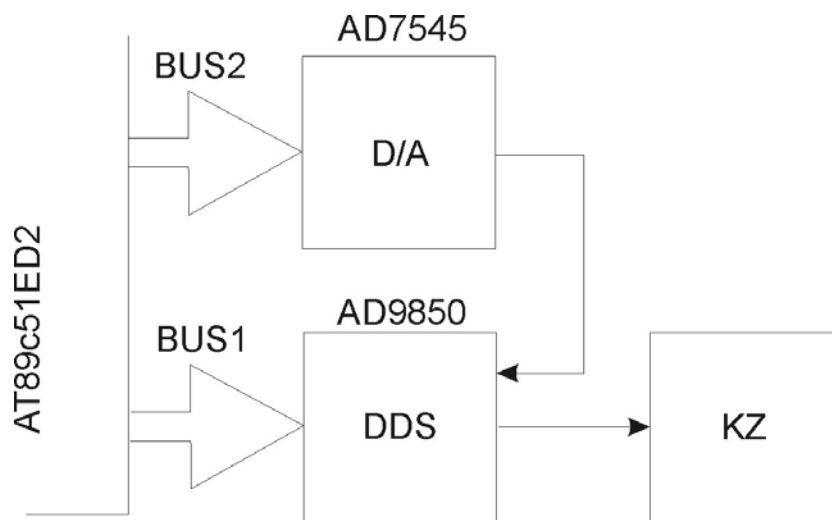
## 3.2 Blok generátoru funkcí

Aby bylo možné měřit impedanci na reproduktoru, je třeba generátor funkcí s možností přeladění od 15-ti do 100Hz. Možnosti realizace jsou:

- 1) Napětím řízený oscilátor MAX038. Tento obvod je ovšem velmi teplotně závislý a neumožňuje dostatečné přeladění v potřebném frekvenčním pásmu.
- 2) Sekvenční automat, který bude pomocí tabulky hodnot generovat digitální slovo. To se potom pomocí D/A převodníku převede na analogovou hodnotu. Frekvence výstupního signálu by se potom měnila s frekvencí na hodinovém bitu a nebo děličkou. Výhodou je potom možnost číslicového řízení amplitudy.
- 3) DDS – integrovaný obvod, který pomocí digitální syntézy generuje požadovaný signál. Jeho frekvenci lze měnit pomocí sériového, nebo paralelního rozhraní. Amplituda se ovšem pořád řídí napětím.

Nakonec jsem zvolil třetí možnost a to konkrétně na integrovaný obvod AD9850 od firmy analog devices.





Obr. 3.3: blokové schéma generátoru funkcí, D/A je digitálně analogový převodník, DDS je sinusový generátor a KZ je koncový zesilovač.

Napájet se smí v rozsahu od 3,3V do 5V. S čipem je možné komunikovat jak paralelně, tak pomocí sériové linky v synchronním režimu. Jelikož byla k dispozici dostatečně široká sběrnice, použil jsem 8mi bitový paralelní přenos. Frekvence se dá potom nastavit pomocí pěti slov zapsaných do příslušného registru. Prvním slovem se nastavuje fázový posun a režim, ve kterém obvod pracuje. Zbylých 32bitů pak slouží k nastavení výstupního kmitočtu. Ten se určí podle vzorce:  $f_{out} = \frac{CLKIN}{2^{32}} \cdot A$ , kde A je hodnota v registru pro nastavení frekvence a CLKIN kmitočet hodin.

Amplituda je regulovaná napětím na pinu 12. Stabilitu potom zaručuje řídicí napětí z 12ti bitového D/A převodníku. Za tímto účelem padla volba na jednoduchý paralelní D/A převodník AD7545, který se napájí v rozmezí od 5V do 15V. Výstupní napětí na koncovém stupni lze regulovat od 0 do 20V

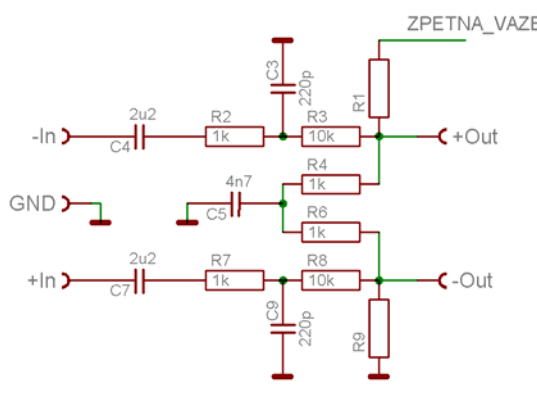
### 3.3 KZ – koncový zesilovač

Blok koncového zesilovače je poslední v řetězci zpracování signálu a slouží pro buzení reproduktoru. Jedná se tedy o výkonový stupeň přizpůsobený pro práci do zátěže o impedanci mezi čtyřmi a osmi  $\Omega$ . Pro zjednodušení a garanci parametrů jsem hledal integrovaný koncový stupeň se zabudovanými ochranami. Kvůli samotnému testování bude potřeba výkon pouhý jeden watt. Vzhledem k dalším možnostem tohoto zařízení jsem

zesilovač naddimenzoval a použil integrovaný obvod TDA7294. Jeho RMS výkon, který může dodat do čtyř ohmové zátěže je zhruba 60 až 70W. V tomto případě pak záleží na schopnosti uchladiť ztrátový výkon na pouzdře. Pouzdro je však spojeno s napájecím napětím a proto je nutné buď odizolovat chladič o zbytku šasi a nebo vložit slídovou podložku mezi chladič a samotný integrovaný obvod.

### 3.3.1 Zapojení KZ

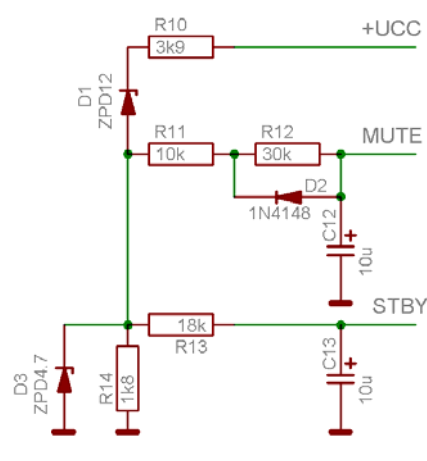
Koncový stupeň jsem zapojil dle katalogového listu. Upravil jsem však vstupní část, kde se použitím diferenciálního zapojení a vstupního filtru značně potlačuje možnost samovolného rozkmitání. Filtr je vyobrazen na obrázku 3.4.



Obr. 3.4: vstupní filtr

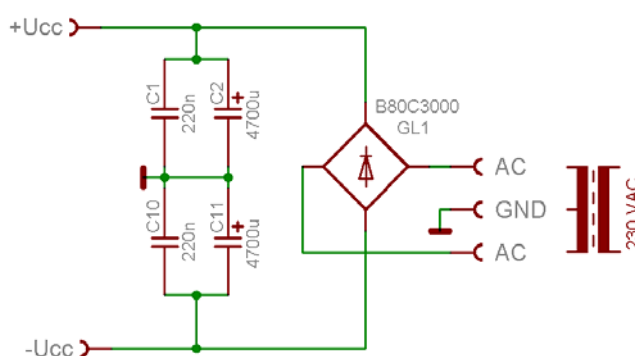
Pro zlepšení parametrů je na výstup připojena dolní propust druhého řádu, která omezí zarušení harmonickými frekvencemi.

Třetí úprava se potom sestává z obvodu zpožděného připojení signálu pomocí vstupu mute a standby. Za tímto účelem jsem zapojil obvod podle obrázku 3.5, což má zaručit připojení zátěže bez proudového nárazu do ní a zároveň včas odpojit v případě poklesu napětí, tak aby nedošlo k příliš rychlému návratu membrány reproduktoru do klidového stavu.



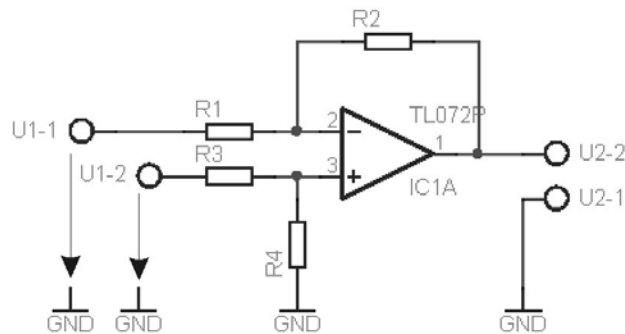
Obr. 3.5: zapojení obvodu zpožděného spouštění.

TDA7294 se napájí symetricky napětím v rozmezí  $\pm 10$  až  $\pm 40$ V. Proto jsem na desku koncového zesilovače umístil napájecí zdroj skládající se z můstkového usměrňovače a vyhlazovacích kondenzátorů. Volil jsem tři ampérový můstek a 4,7mF kondenzátory s ohledem na dostatečnou tvrdost napáječe a malé zvlnění i při velkém zatížení. Schéma zdroje najdete na obrázku 3.6.



Obr. 3.6: zdroj koncového zesilovače

Pro správný chod zesilovače je důležité nastavit správně zesílení. Bylo použito již výše zmíněné diferenciální zapojení. Zjednodušené zapojení je na obrázku 3.7.



Obr. 3.7: diferenciální zapojení zesilovače

K odvození přenosu použijeme zákon superpozice. Problém rozdělme na dva dílčí vzhledem k jednotlivým vstupům. Z pohledu  $U_{11}$  se jedná o invertující zesilovač s přenosem:

$$U_{21} = -\frac{R_2}{R_1} \cdot U_{11}. \text{ Z hlediska napětí } U_{12} \text{ se jedná o neinvertující zesilovač se vstupním děličem}$$

tvořeným odpory  $R_3$  a  $R_4$ . Z toho plyne následující vztah:  $U_{22} = \frac{R_4}{R_3 + R_4} \left( \frac{R_2}{R_1} + 1 \right) \cdot U_{12}$ .

Celkové napětí na výstupních svorkách, odpovídá součtu napětí  $U_{21}$  a  $U_{22}$ .

$$U_2 = \frac{R_4}{R_3 + R_4} \left( \frac{R_2}{R_1} + 1 \right) \cdot U_{12} - \frac{R_2}{R_1} \cdot U_{11}. \text{ Zvolíme-li rezistory } R_3 \text{ a } R_4, \text{ aby platilo: } \frac{R_1}{R_3} = \frac{R_2}{R_4},$$

$$\text{dostaneme výsledný tvar rovnice: } U_2 = \frac{R_2}{R_1} \cdot (U_{12} - U_{11}).$$

Určil jsem v reálném zapojení oba vstupní odpory stejně velké a to s hodnotou  $10\text{k}\Omega$ . Na obrázku 3.4 je reprezentují odpory  $R_3$  a  $R_8$ . Hodnotu zesílení volím 5, proto odpory  $R_1$  a  $R_9$  musí mít hodnotu  $R_1 = A_u \cdot R_2 = 5 \cdot 10\text{k} = 50\text{k}\Omega = R_9$ . Nejblíže hodnotou z řady E24 je potom  $47\text{k}\Omega$ .

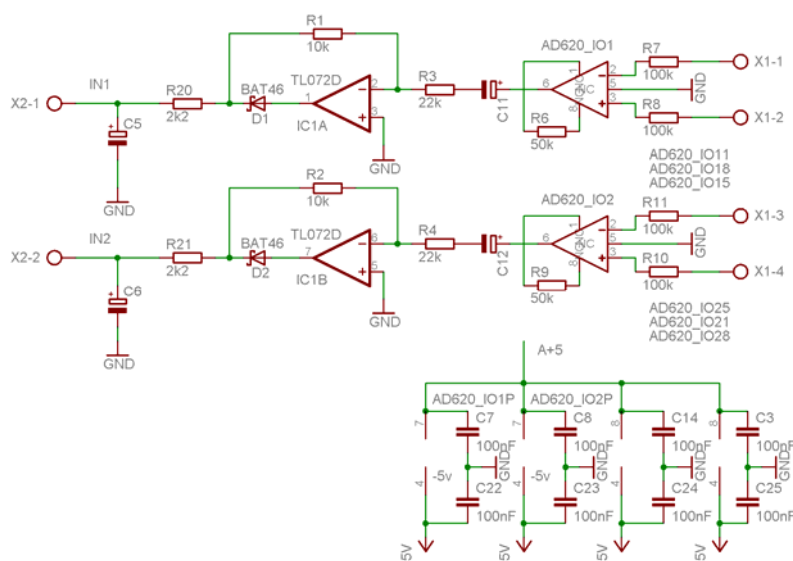
### 3.4 Vstupní obvod

Úkolem vstupního obvodu je zajistit a zpracovat přicházející signál pro A/D převodníku takovým způsobem, aby jej neovlivňoval a nezanášel do měření chyby, které by snížily jeho vypovídací schopnost.

Protože bude měření probíhat na zátěžích malé impedance, je nutno zajistit, velký vstupní odpor předzesilovače. Toho dosáhneme zapojením přístrojového OZ AD620. Další jeho nespornou výhodou se pak stává precizní nastavení zesílení pomocí jediného odporu.

Výrobce potom udává pro jeho výpočet následující vzorec:  $R_G = \frac{49,4 \cdot 10^3}{G}$ , kde G je

požadované zesílení. Signál jímž se zátěž napájí má sinusový průběh. Předzesilovač tedy je nutné zohlednit také co se týká šířky pásma, které dokáže přenést. Podle katalogového listu tento údaj závisí na zesílení. Pro všechny frekvence průběhů, která jsou deklarované v metodě měření, šířka pásma stačí v celém rozsahu zesílení a to od 1 do 10 000. AD620 se smí napájet napětím v rozsahu +/- 2,3 až +/-18V.



Obr. 3.8: zapojení vstupního obvodu.

Druhým blokem vstupního obvodu je aktivní usměrňovač. Zapojením na obrázku 3.8 dosáhneme přeměny sinusového signálu na stejnosměrný, který má hodnotu **amplitudy**. OZ jsem vybíral s ohledem na jeho nízký šum a rozsah napájecího napájení. To znamená, aby fungoval při +/- 5V. Všechna tato kritéria splňuje TL072. Posledním křemíkovým prvkem ve výše uvedeném zapojení je usměrňovací dioda. Protože musí zvládat i frekvence řádově stovky hertz, použil jsem rychlou Schottkyho diodu BAT46.

### 3.4.1 Nastavení zesílení

Nejprve je nutné určit rozsah měřeného napětí. Podle schématu na obrázku 3.1 je zřejmé, že jeden měřicí kanál bude měřit přímo na svorkách reproduktoru proti zemi a druhý na měřicím odporu. Protože impedance odporu  $R_i$  je značně menší než kterou dosáhne

cívka reproduktoru, bude i úbytek na  $R_i$  malý. Z toho plyne velký rozdíl měřených napětí obou kanálů. Maximum měřeného napětí na svorkách reproduktoru potom bude podle vzorce  $U = \sqrt{P \cdot R}$  odpovídat 2V pro 4 ohmovou zátěž a 1,76V pro  $8\Omega$  při 1W výkonu. Pro měření napětí na odporu  $R_i$  je maximum napětí rovno 25mV.

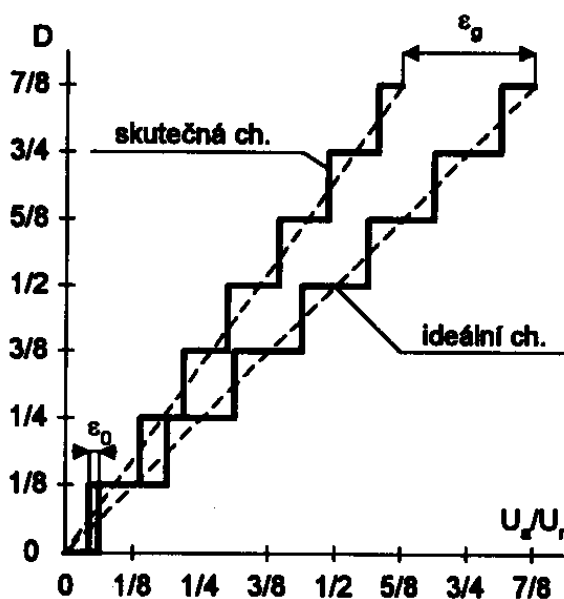
V druhém kroku je potřeba rozhodnout jak velké referenční napětí A/D převodníku zvolím s ohledem na požadovanou přesnost a rozsah vstupního napětí. Protože se úroveň vstupního napětí pohybuje okolo 2V, bude zdroj referenčního napětí dodávat 2,5V, a tedy zesílení AD620 nastavím na hodnotu 0,5 pro kanál měřící na svorkách reproduktoru a pro druhý kanál 50. Zesílení obvodu aktivního usměrňovače potom nastavím na 1 pro oba kanály.

## 3.5 A/D převodník

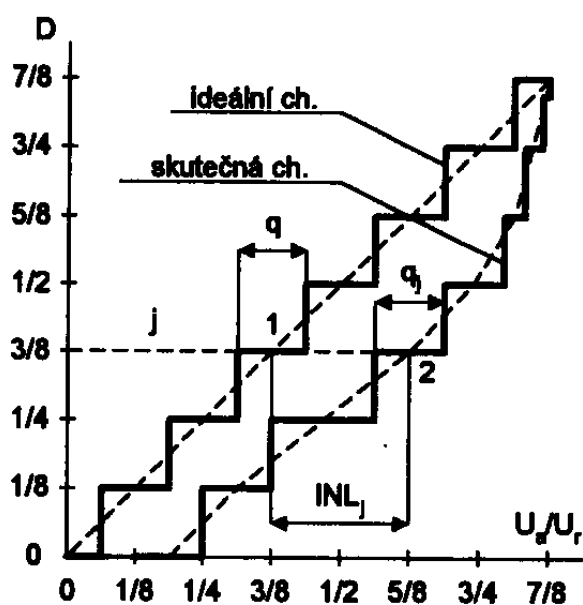
Blok A/D převodníku je určen pro převádění analogových hodnot na digitální data, která se potom dále zpracují v procesorové jednotce. Pro volbu správného typu převodníku je nutné zhodnotit následující parametry:

### 3.5.1 Chyby A/D převodníku

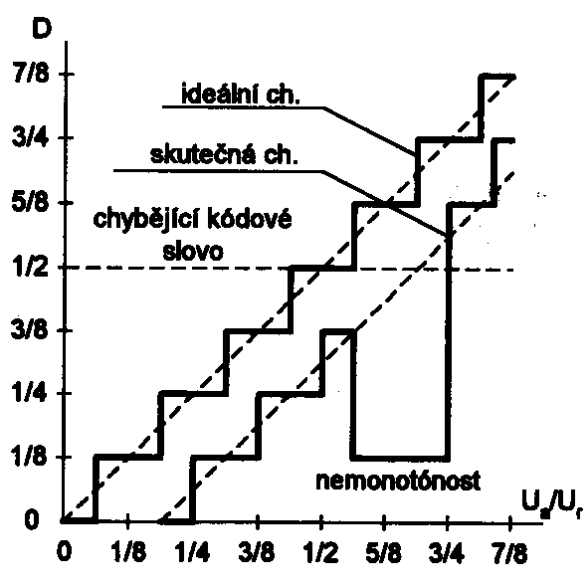
Jednotlivé chyby A/D převodníku jsou nejlépe patrné na převodní charakteristice. Na vodorovnou osu je vyneseno poměr výstupního napětí  $U_a$  k referenčnímu napětí  $U_r$  a na svislou osu vstupní kódové slovo  $D$ . Pro kvantovací chybu, která je vidět na obrázku 3.12 se na svislou osu vynáší velikost kvantovací chyby  $\varepsilon_q$ .



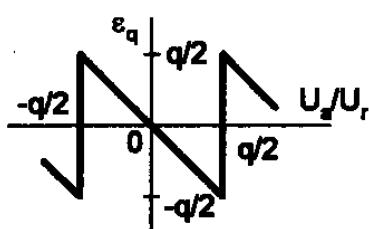
obr. 3.9: převodní charakteristika A/D převodníku s chybami zesílení a nuly.



obr. 3.10: převodní charakteristika A/D převodníku s chybami INL a DNL



obr. 3.11: nemonotónnost převodní charakteristiky



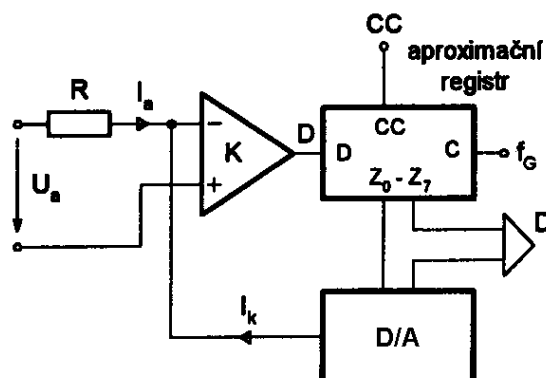
obr. 3.12: kvantování chyba A/D převodníku

### Popis chyb k obrázkům:

- $\varepsilon_0$  je chyba nuly - Odpovídá odchylce mezi ideální a skutečnou první hranou převodní charakteristiky.
- $\varepsilon_g$  chyba zesílení - To je napět'ový rozdíl mezi ideální a skutečnou směrnici zesílení
- *INL* - integrální nelinearita je napět'ový rozdíl středů kvantovacích úrovní mezi ideální a skutečnou převodní charakteristikou A/D převodníku v j-té digitální hodnotě.
- *DNL* - diferenciální nelinearita je napět'ový rozdíl dvou kvantovacích úrovní ideální a skutečné převodní charakteristiky A/D převodníku v j-té digitální hodnotě.
- Chyba vlivem ztráty jednotlivých bitů odpovídá počtu neplatných bitů, které byly ztraceny při přenosu dat.
- $\varepsilon_q$  je kvantovací chyba způsobena digitalizací (kvantováním) analogové veličiny.

### 3.5.2 Princip aproximačního A/D převodníku

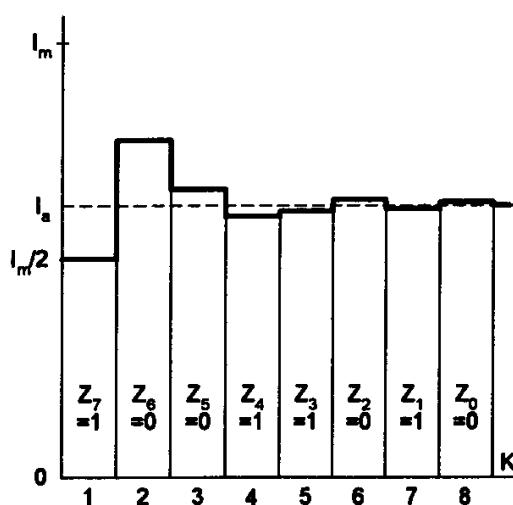
Aproximační A/D převodník pracuje na principu postupného se přibližování se skutečné hodnotě. Blokové schéma převodníku je uvedeno na obrázku 3.13. Zde je vidět, že aproximační A/D převodník obsahuje aproximační registr, převodník napětí proud (odpor R), proudový komparátor K a D/A převodník. Analogovou veličinu, A/D převodník převede v  $N+1$  taktech. Kde  $N$  je počet bitů převodníku. Rychlost taktů závisí na frekvenci generátoru. Poslední takt slouží pro potvrzení binárního kódu, který odpovídá vstupní analogové veličině  $U_a$ .



obr. 3.13: principiální schéma aproximačního převodníku



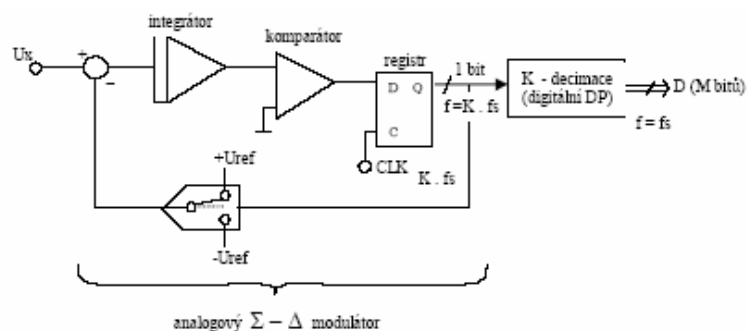
Princip převodu je v postupném porovnávání proudů z D/A s proudem  $I_a$ , který odpovídá vstupnímu napětí  $U_A$ . Průběh aproximace je na obrázku 3.14.



obr. 3.14: průběh proudu  $I_k$

### 3.5.3 Modulační A/D převodníky

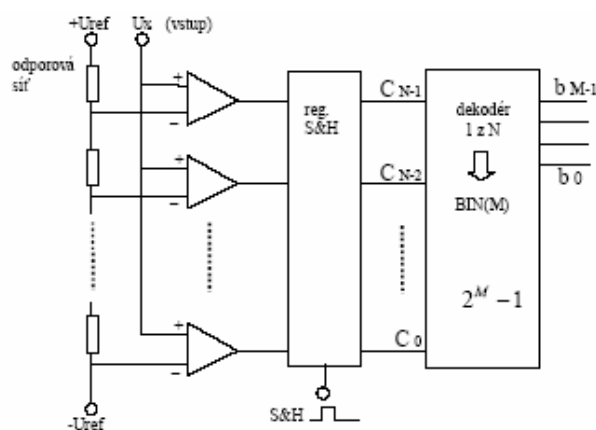
Koncepce modulačních převodníků vychází z principu integračních ADC, které pracují s převzorkováním signálu  $K$  násobnou frekvencí a kvantovanou zpětnou vazbou.  $\Sigma$ - $\Delta$  modulátor generuje 1-bitový výstup, jehož posloupnost s frekvencí  $K \cdot f_s$  se v decimátoru převádí na průměrnou hodnotu o frekvenci  $f_s$ . Decimátor funguje jako digitální DP filtr. Nejjednodušší variantou je čítač, ten však vyžaduje vysoké  $K = 2^M$ . Díky integraci se posouvá kvantizační šum do oblasti nad  $2 / f_s$ , kde se potlačí digitální filtrací decimátoru. Převodník proto může mít zapojený pouze jednodušší analogový filtr potlačující frekvence  $> K \cdot f_s$ . Blokové schéma je na obrázku 3.15.



Obr. 3.15: modulační  $\Sigma$ - $\Delta$  převodník

### 3.5.4 A/D převodníky s přímým převodem (paralelní)

Jednostupňové paralelní A/D převodníky umožňují okamžitý převod (flash) rychlostí 10-100ns. Vzorkují pomocí S&H registru. Jeho nevýhodou je potom vysoká obvodová složitost. Čip obsahuje  $2^M$  elementů. U tohoto typu převodníku jsou nemalé nároky na přesnost odporů zabudovaných v převodníku, což je patrné i z obrázku 3.16.



Obr. 3.16: paralelní A/D převodník

Pro zjednodušení a zlevnění zařízení se používají kaskádní spojení několika jednodušších přímých ADC. Převod se tak rozdělí na dvě fáze: hrubý a zpřesňující převod. Díky S&H2 a 3 lze zpracovávat jednotlivé fáze současně při stejném rozlišení a srovnatelné rychlosti převodu.

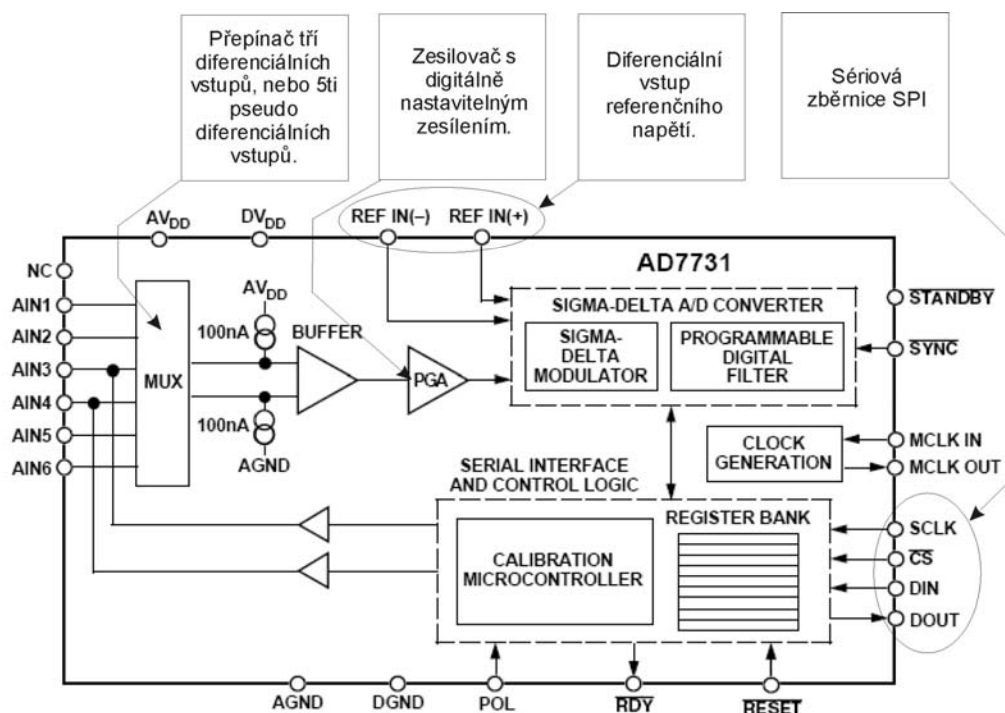
### 3.5.5 Volba převodníku

Druh převodníku	Výhody	Nevýhody
Aproximační	levný, přesný	malá odolnost proti rušení, velmi pomalý
Modulační $\Sigma$ - $\Delta$	vysoké rozlišení až 24bit	pomalý
Paralelní	rychlý, velké rozlišení	drahý, velká obvodová složitost

Vzhledem k okolnostem jsem zvolil modulační převodník, i přesto, že nepatří už z principu mezi nejrychlejší. Tento fakt však není v této úloze důležitý, protože A/D převodník má za úkol vzorkovat stejnosměrné napětí, nebo jen velmi pomalu se měnící průběhy. Jeho hlavní předností se potom stává vysoké rozlišení a přijatelná cena.

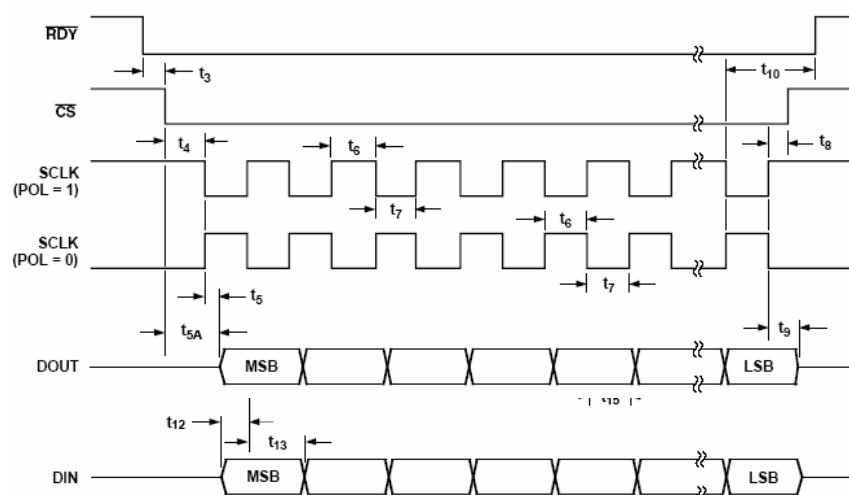
### 3.5.6 $\Sigma$ - $\Delta$ převodník AD7731

AD7731 je 24 bitový A/D převodník obsahující tři diferenciální vstupy s možností nastavit digitálně vstupní rozsah buď v bipolárním režimu od -1,28V do 1,28V, nebo v unipolárním módu od 0 do 2,5V.



Obr. 3.17: blokové schéma AD7731.

Komunikace a nastavení včetně kalibrace se provádí pomocí SPI rozhraní. Časovou souslednost signálů najdete na obrázku 3.18.



Obr. 3.18: Časová posloupnost signálů na SPI

Proto, aby se čip dal ovládat je nutné dodržet komunikační protokol. Převodník se řídí pomocí osmi bitového komunikačního registru a šesti ovládacích registrů. Úkolem CR (komunikační registr) je nastavit adresu jednoho z šesti řídících a kalibračních registrů. Dále nastavit způsob zápisu, nebo čtení paměťových míst. Převodník obsahuje tyto registry:

**Status registr** – podává zprávu o nastavení čipu. Obsahuje signály Standby, Noref pomocí kterých je snadné ověřit funkci zařízení.

**Mode registr** – 16ti bitový registr kterým se nastavují jednotlivé činnosti, které po převodníku požadujeme. Například kalibrace, nebo způsob převodu a volba kanálu.

**Filtr registr** – 16ti bitový registr sloužící pro nastavení filtru decimátoru.

**Data registr** – obsahuje 24 bitů do nichž se ukládá nevzorkovaná analogová hodnota.

**Offset registr, Gain registr** - je určen pro kompenzaci systémových chyb měření.

Pro měření na této úloze jsem po kalibraci nastavil převodník do unipolárního režimu a vstupní rozsah zvolil 1,28V. Protože potřebuji měřit dvě hodnoty napětí zapojil jsem první dva kanály v módu, kdy jsou nastaveny jako diferenciální vstupy. Z každého kanálu čtu střídavě jednu hodnotu, která se potom pošle do procesorové jednotky k dalšímu zpracování.

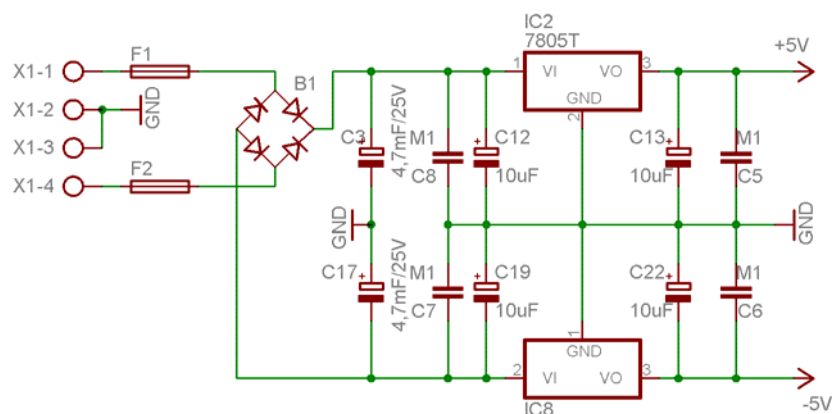
## 4. Zdroj

Pro správnou funkci zařízení je nutno zvolit velikost napájecího napětí a vzhledem k tomu i jištění.

n kusů	obvod	Un [V]	In+5V [mA]	In-5V [mA]	In +38V [A]	In -38V [A]
1	AT89c51ED2	5	100			
3	TL072	±5	30	30		
1	TL431	5	10			
1	MAX232	5	5			
2	AD620	±5	3,2	3,2		
1	AD7574	5	2			
1	AD7731	5	15			
1	AD9850	5	50			
1	TDA7294	±38			2,5	2,5
proud napájecí větví			215,2	33,2	2,5	2,5

Tabulka 4.1: napěťová a proudová bilance zařízení

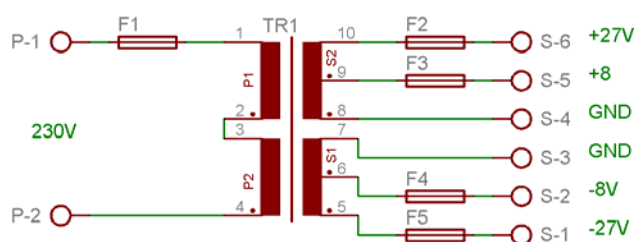
Z výše uvedené tabulky plyne potřeba čtyř napájecích větví  $\pm 5V$  0,5A a  $\pm 38V$  2,5A. Zdroj je naddimenzovaný tak, aby byl dostatečně tvrdý a odolný proti proudovým nárazům. Zdroj koncového zesilovače je rozkreslen na obrázku 13. Napáječ  $\pm 5V$  najdete na obrázku 4.1. Celá koncepce je založena na lineárních obvodech řady 78xx a 79xx. Není to sice nejúčinnější řešení, ale na druhou stranu tyto stabilizátory nezanášejí do zařízení rušení jako zdroje spínané.



Obr. 4.1: zdroj  $\pm 5V$  0,5A

## 4.1 Transformátor

Z tabulky 2 plyne, že na sekundární straně musí mít transformátor 4 vinutí: 2krát 8V/0,5A a 2krát 27V/2,5A. To znamená, že transformátor musí přenést 150W. Podle toho můžeme určit jištění primárního vinutí. Pojistka na primáru vychází pro tento výkon 0,7A. K tomu je ještě potřeba zohlednit proudový náraz při zapnutí napájení, který je způsoben sycením magnetického obvodu a také ztrátový výkon v železe. Takže pojistku jsem zvolil pomalou tavnou o nominálním proudu 1A.



Obr. 4.2: zapojení transformátoru a jištění.

Jištění sekundárního vinutí se potom realizuje pomocí pojistek, která budou mít nominální hodnoty proudu pro +/-8V 0,5A a pro +/-27V 2,5A.

## 5. Usazení jednotlivých dílů do šasi

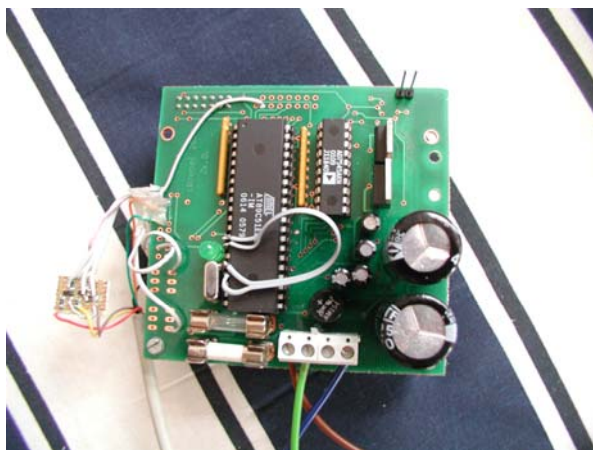
### 5.1 Návrh desky plošných spojů

Po dokončení schématu, které najdete v ucelené podobě v příloze této práce, je dalším krokem návrh desky plošných spojů. Jako návrhový systém jsem zvolil Eagle verzi 4,16. Jelikož nejsem vlastníkem licence, tak jsem celý návrh realizoval v trial verzi tohoto programu, kde jsou omezené rozměry desky. Celý design se mi na vymezený prostor nevešel, proto je celý systém tvořen jako modulární, tak, aby k němu bylo možno snadno připojit více periférií.

Schéma je rozděleno na dvě části. Na základní desku a desku vstupně výstupní. Základní deska, dále jen ZD, tedy obsahuje procesor v pouzdře DIL40 a stabilizovaný zdroj napětí  $\pm 5V$  určený pro napájení procesoru a operačních zesilovačů. Kromě zdroje a kontroléru je na ZD ještě umístěn 12ti bitový D/A převodník s příslušnou filtrací, který má za úkol v tomto případě ovládat úroveň výstupního signálu generátoru funkcí. Dále se zde řeší sériová komunikace pomocí obvodu MAX232.

Vstupně výstupní deska, dále jen VD je osazena sběrnici BUS1 po které se přenášejí data mezi ZD a perifériemi, které jsou na ni připojeny, jako je DDS, nebo A/D převodník. Pro správný chod zařízení bylo nejlepším řešením oddělit digitální a analogové napájení tlumivkou, tak aby nedocházelo k zarušení analogového napájecího napětí.

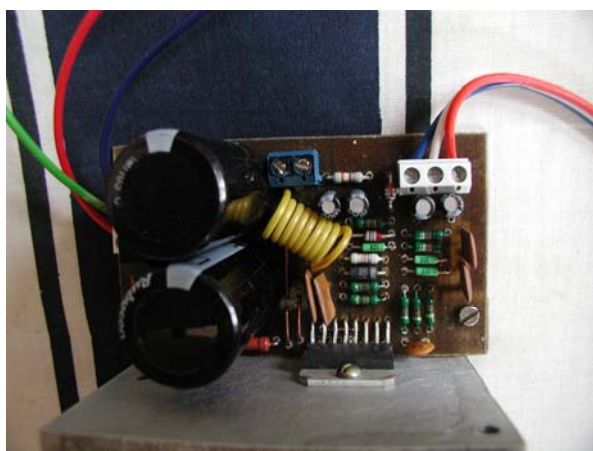
Abych uspořil místo na desce plošných spojů (DPS) osadil jsem všechny dostupné součástky v smd pouzdrech, čímž navíc odpadla nutnost vrtání velkého množství děr.



Obr. 5.1: Základní deska.



Obr. 5.2: Vstupní obvod.



Obr. 5.3: koncový zesilovač



## 5.2 Usazení v krabici

Posledním úkolem při konstrukci zařízení je usazení desek a konstrukčních dílů do krabice. V tom to případě se klade velký důraz na bezpečnost a elektromagnetickou kompatibilitu jak z pohledu vytváření rušení, tak i odolnosti proti rušení.

Nejprve se musí vytypovat šasi, do kterého se umístí všechny potřebné díly. Použil jsem šasi o rozměrech 240x142x197mm. Rozvržení součástí uvidíte na obrázku 5.4.



Obr. 5.4: rozmístění základních prvků zařízení v šasi.

Celou konstrukci jsem koncipoval jako zařízení třídy 1. Hlavním důvodem této volby je kovový materiál ze kterého je krabice zhotovena a potom také rozměrové proporce, protože pro konstrukci zařízení třídy 2 (zařízení fungující bez vodiče PE) se musí dodržet větší vzdálenosti přírodních vodičů od kovových částí a klade se větší důraz na tuhost šasi.

Transformátor jsem umístil na pravé straně ve vzdálenosti větší než 5mm od stěny, tak aby se co možná nejvíce zabránilo možnosti doteku s plechem krabice. I přes precizní stínění transformátoru se ukázalo jako nutnost, umístit kovovou přepážku mezi síťovou část a měřicí obvody.

Základní deska a vstupně výstupní deska jsou umístěny nad sebou na distančních sloupcích a přišroubovány čtyřmi šrouby. Poloha desek umožňuje snadnou manipulaci.

Aby byla dodržena všechna pravidla bezpečnosti, umístil jsem na zadní panel pojistková pouzdra osazená výše zmíněnými pojistkami a zapojil je podle obrázku 28. Na přívodních síťových vodičích je zapojen dvojitý kolébkový vypínač, který bezpečně odpojí zařízení od sítě a to přerušením fáze i nulového vodiče.

## 5.3 Čelní panel

Rozvržení čelního panelu je důležité nejen z hlediska designu, ale také vzhledem k ergonomii práce s přístrojem. Dalším hlediskem jsou vlivy rušivých signálů jejichž intenzita závisí na poloze konektorů a kabelů.

Nejprve je důležitá volba jednotlivých konektorů. V tomto ohledu se klade důraz hlavně na mechanickou odolnost a prostředí, kde se spoj bude používat. V našem případě se jedná o suché prostory o teplotě pohybující se okolo pokojové teploty tj. 20°C. V tabulce 5.1 najdete rozpisku konektorů.

konektor	účel použití	popis
K201	výstupní svorky koncového stupně	přístrojová svorka
BNC-Z50	výstup generátoru funkcí	BNC zásuvka do panelu
K356	výstup generátoru funkcí	JACK zásuvka do panelu 6,3mm
K357	vstupní svorky měřicího obvodu	JACK zásuvka do panelu 6,3mm
K201	vstupní svorky měřicího obvodu	přístrojová svorka

Tabulka 5.1: popiska použitých konektorů

Detailní rozkreslení čelního panelu včetně popisů najdete v příloze 1.

## 6. Měřicí ozvučnice

Jak je už výše popsáno v metodě měření, ke zjištění ekvivalentního objemu se musí měřit rezonanční frekvence dvakrát. Jednou v otevřeném prostoru bez ozvučnice a podruhé v ozvučnici přesně definovaných rozměrů. Jako materiál postačí smrkové dřevo běžných parametrů o tloušťce 18mm. Vnitřní rozměry ozvučnice zvolím 400x400x300mm. Aby bylo možno měřit na reproduktorech několika průměrů v rozsahu od 8 do 15ti palců. Zhotovím čelní desku výměnnou. Pro její snadnou montáž umístím do ozvučnice vložky s metrickým závitem. Skicu ozvučnice je možné nalézt v příloze 2.

## 7. Software

Pokud je již zařízení hardwarově odladěno, pak je ještě nutností naprogramovat jednočip a stanovit komunikační protokol pro jeho komunikaci s nadřazeným systémem. Diagram komunikace najdete na obrázku 7.1.



*Obr. 7.1: komunikační diagram.*

Z obrázku 30 plyne, že nadřazený systém pošle čtyřbajtový příkaz a jeden bajt jako argument. Zařízení odpoví, pokud je to žádoucí. Nejprve odešle počet bajtů a poté zbytek dat. Syntaxi příkazů objevíte v tabulce 7.1.

příkaz	funkce	očekávaná odpověď
rsta	softvérový reset	uvítací hláška
frqA_	nastavení frekvence - desetiny Hz	vrátí aktuální frekvenci
frqB_	nastavení frekvence - stovky Hz	vrátí aktuální frekvenci
frqC_	nastavení frekvence - MHz	vrátí aktuální frekvenci
cal 1	kalibrace prvního kanálu A/D	hotovo
cal 2	kalibrace druhého kanálu A/D	hotovo
rng 1	rozsah hodnot na kanálu1	hotovo
rng 2	rozsah hodnot na kanálu2	hotovo
Ddat1	pošle 10 vzorků z kanálu1	paket 31 bajtů
Ddat2	pošle 10 vzorků z kanálu2	paket 31 bajtů
ldat1	pošle 1 vzorek z kanálu1	paket 4 bajtů
ldat2	pošle 1 vzorek z kanálu2	paket 4 bajtů
test	ověří funkci přístroje	pošle výpis kontroly
sta?	vyčte stav řídicích registrů	pošle paket x bajtů
ping	ověření funkce komunikace	ping

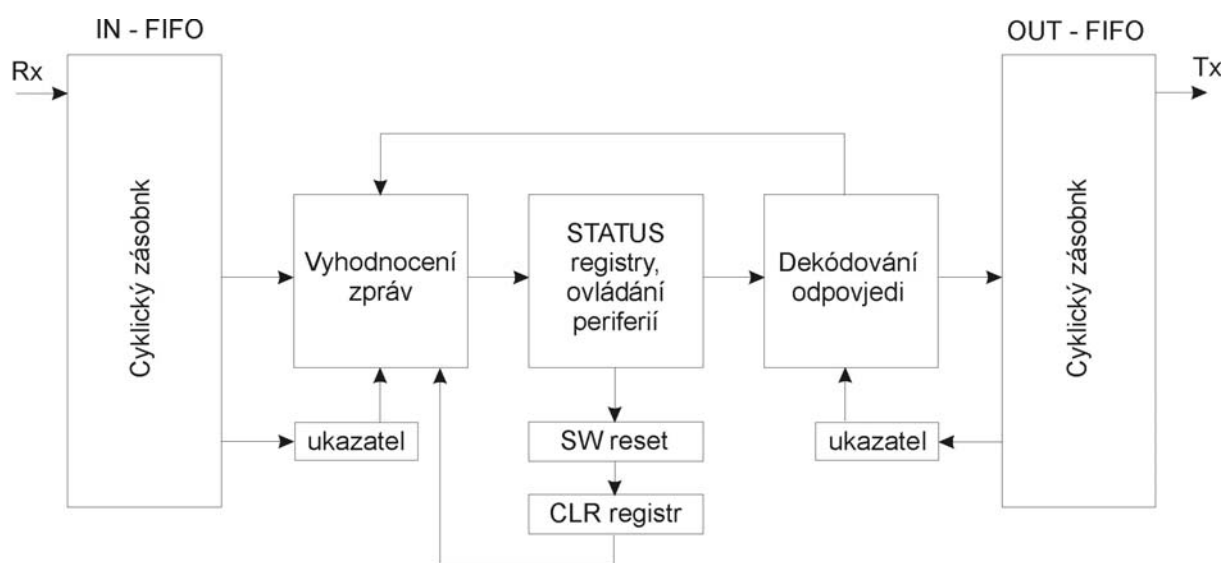
\_ znamená argument od 0 do 100 převedený do ascii kódu

*Tabulka 7.1: syntaxe funkcí*

Celý systém je navržen tak, aby jej bylo možno ovládat pomocí běžně dostupných prostředků na jakémkoli počítači standardu PC. Za tímto účelem postačí jakýkoliv terminál zajišťující spojení mezi počítači pomocí sériového rozhraní RS-232.

## 7.1 Zpracování dat

Protože jsem zvolil poměrně pomalou rychlost sériové linky (9600 baudů) je nutné data řadit do fronty, jak pro odesílaná data, tak i pro zpracování příchozích zpráv. Pro oba dva případy je nejvhodnější cyklický zásobník FIFO o 100 paměťových místech.



Obr. 7.2: blokové schéma řídicího systému, které je reprezentováno kódem

Na obrázku 7.2 vidíte v hrubých rysech blokové schéma výpočetní struktury, která zajišťuje ovládání systému a jeho komunikaci.

## 7.2 Vyhodnocování zpráv

Ve chvíli, kdy se uloží do zásobníku IN – FIFO bajt, rutina vyhodnocení zpráv čeká, než bude rozdíl mezi ukazatelem a registrem označujícím volný paměťový prostor roven 5. Pokud se tak stane, pak rutina přečte bajty v prostoru mezi výše zmíněnými registry a vyhodnotí je jako zprávu. Ta se potom v další části programu třídí. Je – li označena jako

platná, uloží se výsledek do patřičných registrů, které ovládají periferie. Prostor v zásobníku, který obsahoval tuto zprávu se označí jako prázdný.

## **7.3 Ovládání periferií**

Po zpracování zprávy a jejím dekódování se uloží data do patřičných registrů, které slouží pro výpočet hodnot jednotlivým periferiím. Rutina se provede ve chvíli, kdy se nastaví příznak pro aktualizaci hodnot určité části zařízení. V tomto případě to jsou A/D převodník, generátor funkcí realizovaný obvodem AD9850 a D/A převodník řídící výstupní napětí generátoru.

## **7.4 Dekódování zpráv**

Protože toto zařízení komunikuje obousměrně, to znamená, že posílá zpět data, je nutné je zpracovat a připravit k odeslání do zásobníku OUT – FIFO. Úkolem této rutiny je tedy zpracovávat surová data, dopočítávat délku odeslaného rámce a případně doplňovat redundantní kód, určený k zaručení bez chybového přenosu.

## **7.5 Obslužná aplikace**

Poslední vrstvou této struktury může být specializovaná aplikace psaná v libovolném programovacím jazyce, který umožňuje ovládání sériového portu. Výhodou je možnost číslicového zpracování vzorkovaných dat jako průměrování a možnost zařazení číslicového filtru.

Pro usnadnění měření této úlohy by bylo vhodné, aby tato nadstavbová aplikace dokázala na každé frekvenci měřeného spektra získat několik vzorků a vypočítala průměr. Z nich potom nalézt maximum a určit tak rezonanční kmitočet. Po provedení měření v otevřeném prostoru a uzavřené ozvučnici definovaných rozměrů dosadit obě rezonanční frekvence do vzorce 2.1.

## 8. Protokol o měření $V_{as}$ na reproduktoru ARN 6604

Měření bylo provedeno výš popsaným přístrojem Pikolo za podmínek:

$U_n$	0,506 V
$R_i$	0,1 $\Omega$
$V_{ro}$	37,75 l

Naměřené hodnoty:

f [Hz]	$U_{Ri}$ [mV]	$U_L$ [mV]	I [mA]	Z [ $\Omega$ ]
30	6,4	494	64	7,72
31,5	6	495	60	8,25
33	5,54	496	55,4	8,95
34,5	5,08	497	50,8	9,78
36	4,6	498	46	10,83
37,5	4,12	499	41,2	12,11
39	3,64	500	36,4	13,74
40,5	3,16	501	31,6	15,85
42	2,68	502	26,8	18,73
43,5	2,36	503	23,6	21,31
45	2,06	504	20,6	24,47
46,5	1,82	504	18,2	27,69
<b>48</b>	<b>1,78</b>	<b>504</b>	<b>17,8</b>	<b>28,31</b>
49,5	1,9	504	19	26,53
51	2,16	504	21,6	23,33
52,5	2,52	504	25,2	20,00
54	2,9	504	29	17,38
55,5	3,28	504	32,8	15,37
57	3,68	503	36,8	13,67
58,5	4,08	503	40,8	12,33
60	4,44	502	44,4	11,31
61,5	4,78	501	47,8	10,48
63	5,12	501	51,2	9,79
64,5	5,42	500	54,2	9,23
66	5,7	500	57	8,77
67,5	5,98	500	59,8	8,36
69	6,24	500	62,4	8,01
70,5	6,48	499	64,8	7,70
72	6,72	498	67,2	7,41
73,5	6,94	497	69,4	7,16
75	7,12	497	71,2	6,98
76,5	7,3	496	73	6,79
78	7,46	495	74,6	6,64
79,5	7,62	494	76,2	6,48

*Tatulka 8.1: Rezonanční frekvence bez ozvučnice je 48 Hz.*

f [Hz]	URi [mV]	UL [mV]	I[A]	I [mA]	Z[Ω]
30	8,5	487		85	5,73
31,5	8,38	487		83,8	5,81
33	8,26	488		82,6	5,91
34,5	8,1	488		81	6,02
36	7,96	489		79,6	6,14
37,5	7,76	489		77,6	6,30
39	7,58	490		75,8	6,46
40,5	7,36	491		73,6	6,67
42	7,12	491		71,2	6,90
43,5	6,84	492		68,4	7,19
45	6,54	492		65,4	7,52
46,5	6,22	493		62,2	7,93
48	5,86	494		58,6	8,43
49,5	5,48	495		54,8	9,03
51	5,12	496		51,2	9,69
52,5	4,74	497		47,4	10,49
54	4,34	497		43,4	11,45
55,5	3,94	498		39,4	12,64
57	3,54	499		35,4	14,10
58,5	3,18	500		31,8	15,72
60	2,9	501		29	17,28
61,5	2,68	501		26,8	18,69
<b>63</b>	<b>2,56</b>	<b>502</b>		<b>25,6</b>	<b>19,61</b>
64,5	2,58	502		25,8	19,46
66	2,72	502		27,2	18,46
67,5	3	502		30	16,73
69	3,32	501		33,2	15,09
70,5	3,62	501		36,2	13,84
72	3,98	501		39,8	12,59
73,5	4,34	500		43,4	11,52
75	4,7	500		47	10,64
76,5	5,04	499		50,4	9,90
78	5,38	499		53,8	9,28
79,5	5,72	498		57,2	8,71

Tabulka 8.2: Rezonanční frekvence reproduktoru usazeného v ozvučnici je 63 Hz.

$$V_{as} = V_{ro} \left( \frac{f_{ro}}{f_o} \right)^2 - 1 = 37,75 \cdot \left( \frac{63}{48} \right)^2 - 1 = 46 \text{ [l]}$$





*Graf 8.1: závislost impedance cívky reproduktoru na frekvenci*

## Závěr

Ve své bakalářské práci jsem shrnul všechny dostupné teoretické předpoklady nutné pro měření ekvivalentního objemu. Vybral jsem metodu, kdy porovnáním rezonančních kmitočtů v uzavřeném a otevřeném prostoru je možno zjistit ekvivalentní objem reproduktoru. Za tímto účelem bylo nutno navrhnout měřicí zařízení, které je schopno měřit impedanci daného reproduktoru v závislosti na frekvenci. Řízení přístroje a vyhodnocení dat je umožněno pomocí sběrnice RS232.

Snažil jsem se navrhnout celý systém tak, aby byl levný a zároveň sledoval moderní trendy v elektrotechnice. Vývoj přístroje se podařilo dovést až do fáze praktického zkoušení, kde všechny jeho požadované funkce splnily očekávání. Lze konstatovat, že podle výsledných měření je možno zkonstruovat ozvučnici uspokojivých parametrů.

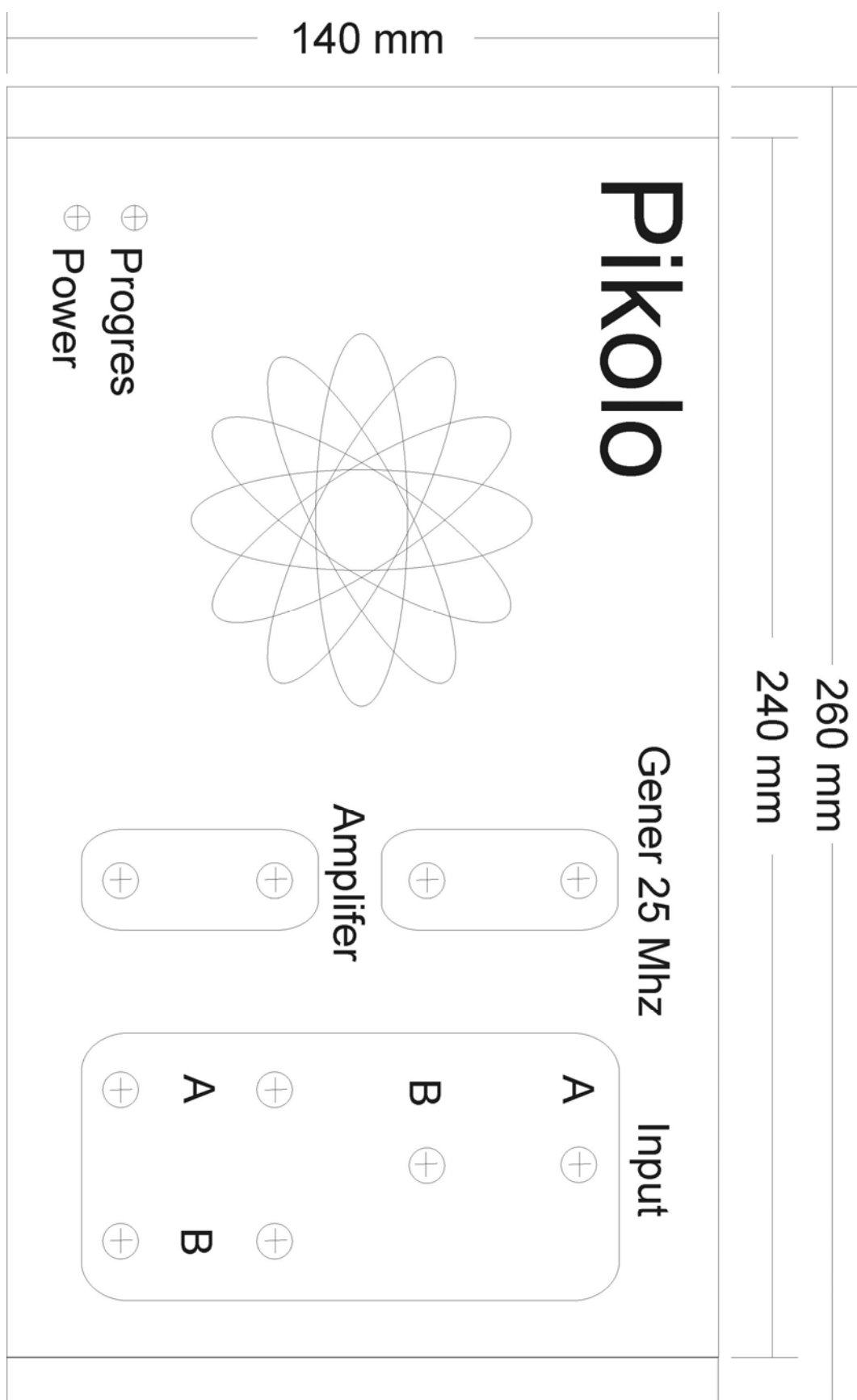
Zařízení bylo nad rámec zadání koncipováno jako multifunkční, umožňuje tedy měřit amplitudu střídavých průběhů na dvou kanálech o napětí do jednoho voltu a frekvenci do 20kHz, dále obsahuje zdroj sinusového signálu pracující až do zátěže  $2\ \Omega$  při výkonu do 50W. Samotný generátor pak umožňuje generovat frekvence do 25MHz. Jeho výstupní napětí lze regulovat pomocí procesoru a také umožňuje modulaci signálu.

Pro další vylepšení přístroje by bylo možno ještě zkonstruovat digitálně říditelný dělič napětí pro oba kanály a samozřejmě vylepšit software. Ten ještě není zcela dokončen a existuje pouze ve verzi, umožňující měření impedance. Pro zjištění údajů potřebných k výpočtu parametru  $V_{as}$  to ale plně postačuje.

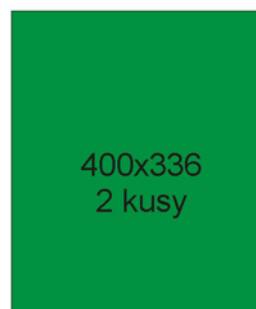
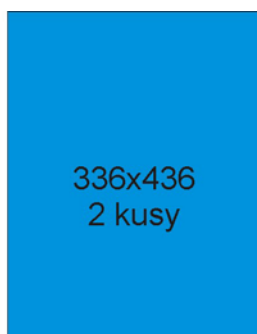
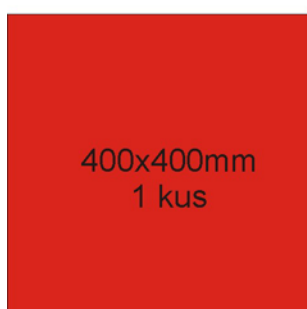
## Literatura

- [1] Svoboda, L., Štefan, M.: Reproductory a reproduktorové soustavy. SNTL, Praha 1976
- [2] Ďaďo, S., Kreidl, M.: Senzory a měřicí obvody. ČVUT, Praha 2000
- [3] Katalogové listy reproduktorů a testovací techniky firmy TVM
- [4] Katalogové listy procesorů firmy Atmel, Maxim
- [5] Vedral J., Fisher J.: Elektrotechnické obvody pro měřicí techniku, vydavatelství ČVUT Praha 2004

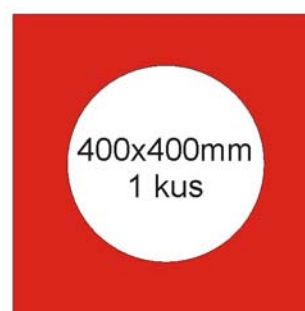
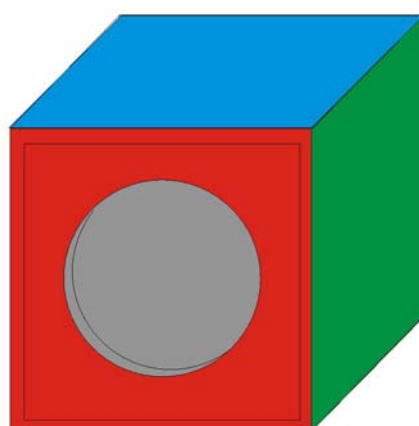
## Příloha 1 – čelní panel



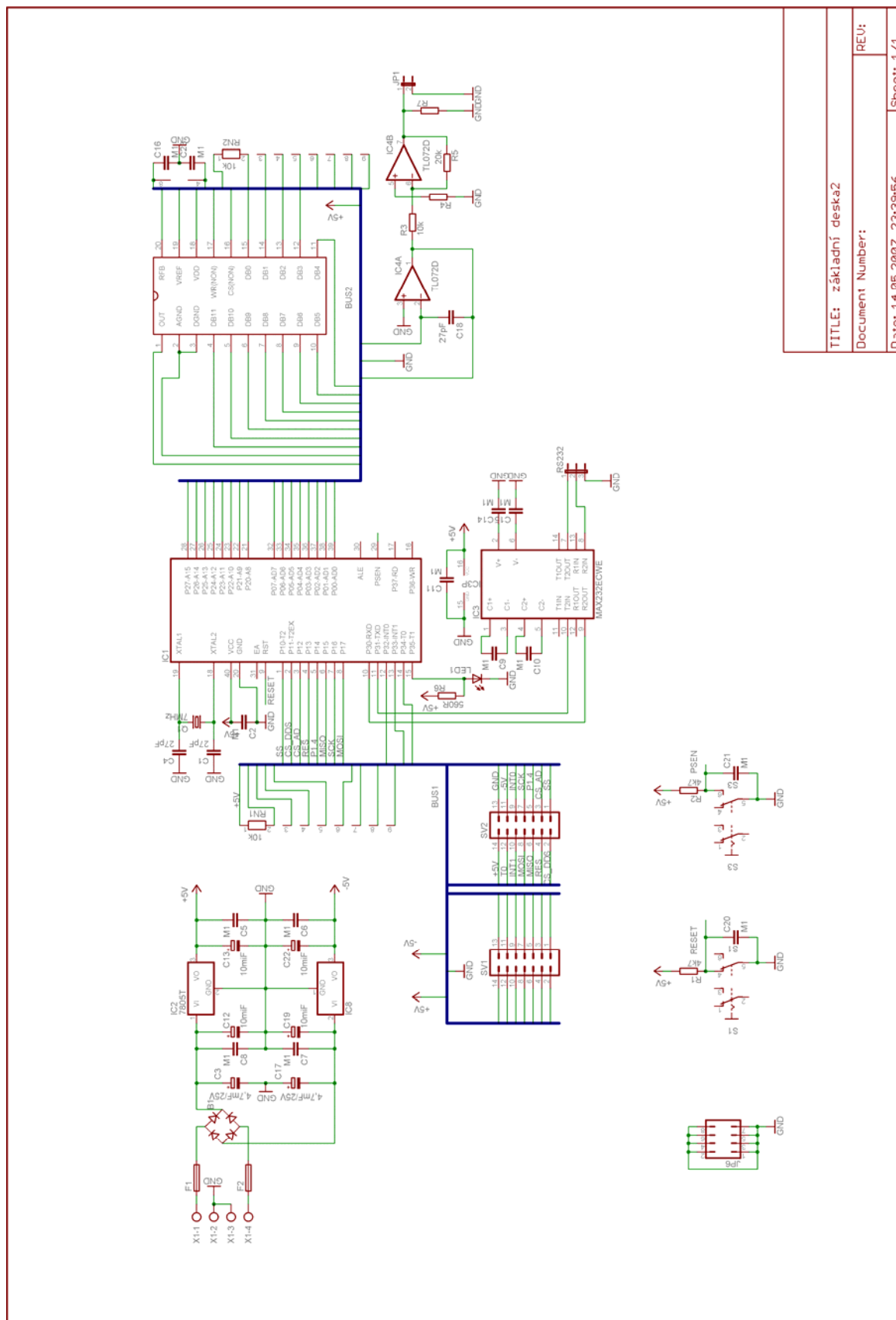
## Příloha 2 – skica měřicí ozvučnice



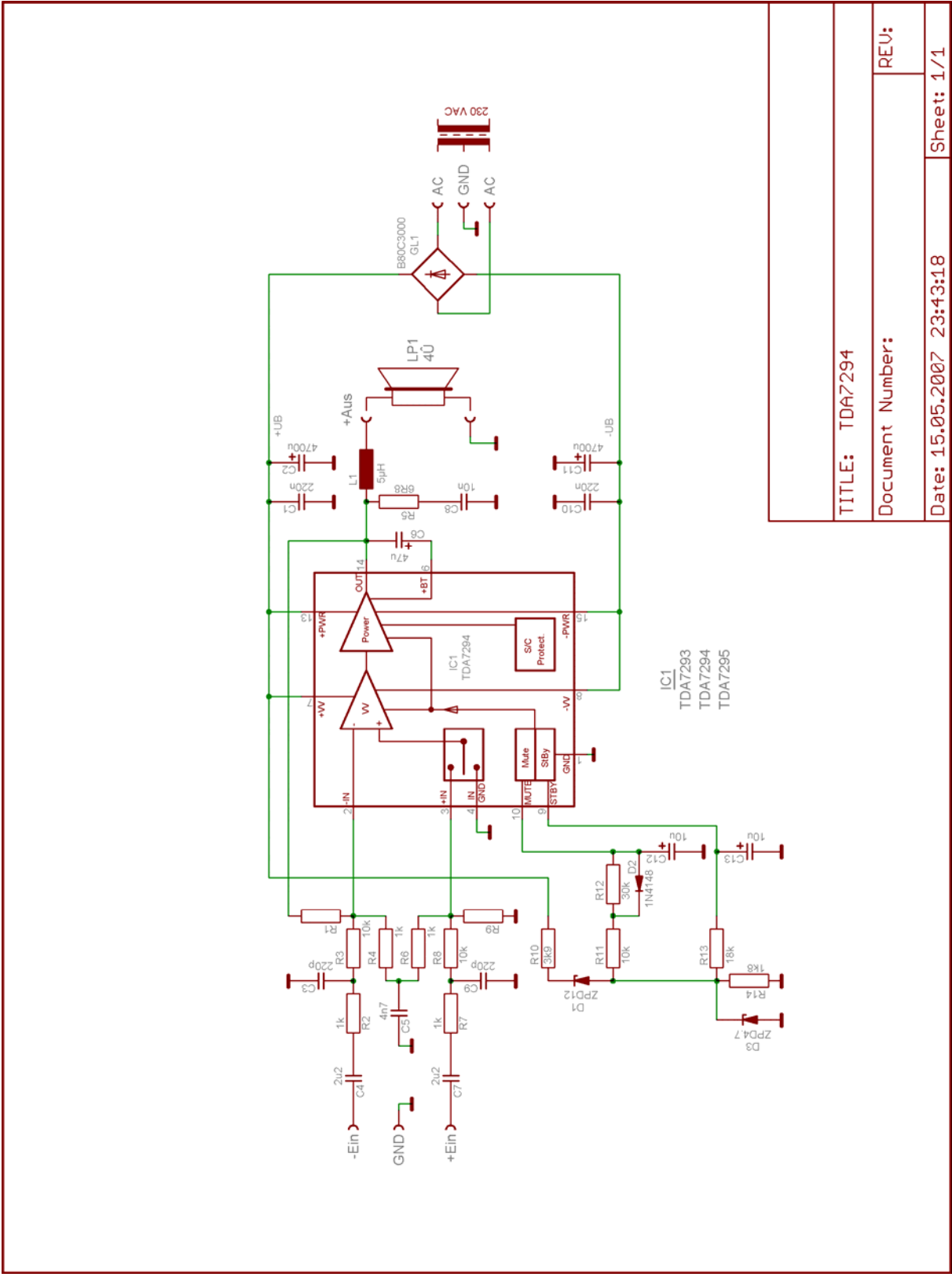
Desky jsou zhotoveny ze dřeva o tloušťce 18mm



## Příloha 3 – schémata







TITLE: TDA7294

Document Number:

REV:

Date: 15.05.2007 23:43:18

Sheet: 1/1



## **Příloha 4 – obsah CD**

Měření ekvivalentního objemu.doc .....	elektronická verze této práce
Měření ekvivalentního objemu.pdf .....	elektronická verze této práce
kod.hex .....	zdrojový kód programu
zakladni deska.sch .....	schéma v programu eagle
vstupní obvod.sch .....	schéma v programu eagle
TDA7294.sch .....	schéma v programu eagle